

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
**KATEDRA MATERIÁLU**

Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie  
Zaměření: Materiálové inženýrství

**Hodnocení vybraných parametrů recyklovaného  
polykarbonátu pro jeho použití v osvětlovací technice  
automobilu**

**Evaluation of selected parameters of recycled polycarbonate  
for its utilization in automotive lighting technology**

**KMT – B – 164**

**JAN PROCHÁZKA**

Vedoucí práce: doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.  
Konzultant: Ing. Jan Hrbáček, Ph.D.

Počet stran: 68

Počet tabulek: 2

Počet obrázků: 38

Počet grafů: 5

Počet příloh: 3

Datum: 3. 1. 2011





## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 3. 1. 2011

Podpis

# **Hodnocení vybraných parametrů recyklovaného polykarbonátu pro jeho použití v osvětlovací technice automobilu**

**JAN PROCHÁZKA**

## ***ANOTACE***

Zvyšování efektivity, aspekt ochrany přírody a maximální využití materiálových zdrojů vede k technologické recyklaci polymerů. V případě materiálů pro čelní světlomety je nejrozšířenějším materiálem polykarbonát a to z důvodu dobré tepelné odolnosti a vhodných technologických vlastností. Bohužel se zvyšujícím se počtem recyklací se zhoršují vlastnosti materiálu. Stanovení mechanických vlastností - pevnosti v ohybu, rázové houževnatosti, stanovení technologických vlastností – indexu toku taveniny a pokovovatelnosti bylo cílem této práce. Výsledky ukazují, že pro potřeby automobilového průmyslu je vhodný pouze nultý a první recyklát. Závěry z této práce budou aplikovány ve výrobním procesu.

**Klíčová slova:** polykarbonát, recyklace, pokovení, vstřikování, mechanické vlastnosti, APEC

## **Evaluation of selected parameters of recycled polycarbonate for its utilization in automotive lighting technology**

## ***ANNOTATION***

Increase in effectiveness, environmental aspects and maximum utilization of material sources leads to technological reprocessing of polymers. In case of materials for headlamps, polycarbonate is the most widespread material because of its good thermal stability and suitable technological parameters. However, higher level of reprocessing cycles leads to worse material characteristics. Determination of mechanical properties – flexural strength and impact strength and determination of technological properties – melt flow rate and ability of metalizing were the aim of this work. Results show that only the zero and first time recycled materials are suitable for automotive headlamp industry. Findings of this work will be applied in production process.

**Key words:** polycarbonate, reprocessing, metalizing, injection moulding, mechanical properties, APEC

## PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji velice své vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Doře Kroisové Ph.D. za vedení při vypracovávání bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval svému konzultantovi Ing. Janu Hrbáčkovi, Ph.D. za cenné rady během mých pokusů a za pomoc při zpracování mého tématu.

Mé nemalé poděkování patří panu Ing. Petru Pavlíčkovi za pomoc při mé experimentální části bakalářské práce, vstřícnost a čas, který mi věnoval.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ITT	Index toku taveniny	[cm <sup>3</sup> /10 min]
APEC	Aromatický polyesterkarbonát	-
PC	Polykarbonát	-
PBT	Polybutylentereftalát	-
( $n_d^{20}$ )	Index lomu	-
$M_w$	Molekulová hmotnost	-
UV	Ultrafialové záření	-
T <sub>g</sub>	Teplota zesklenní (skelného přechodu)	[°C]
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren	-
$p_i$	Vnitřní tlak	[Mpa]
T	Čas	[sek]
F <sub>p</sub>	Prisouvací síla	[N]
F <sub>u</sub>	Uzavírací síla	[N]
$t_{s1}, t_{s2}, t_{s3}$	Doby činnosti stroje	[sek]
$t_v$	Doba vstřikování	[sek]
$t_{ch}$	Doba chlazení	[sek]
$t_d$	Doba dotlaku	[sek]
$t_{pl}$	Doba plastikace	[sek]
tzv.	Tak zvaný	-
$t_k$	Doba odsunutí tavící komory	[sek]
$t_m$	Doba manipulační	[sek]
např.	Například	-
PVD	Physical Vapour Deposition (fyzikální napařování)	-
HMDSO	Hexamethyldisiloxane	-
PET	Polyethylentereftalát	-
PVC	Polyvinilchlorid	-
PE	Polyethylen	-
obr.	Obrázek	-
ČSN	Česká technická norma	-
K	Nárazová práce	[J]

$K_c$	Vrubová houževnatost	[J/cm <sup>2</sup> ]
$S_o$	Plocha tyče pod vrubem	[mm <sup>2</sup> ]
$R_{mo}$	Pevnost v ohybu	[Mpa]
$W_o$	Modul průřezu	[mm <sup>3</sup> ]
$M_{omax}$	Maximální ohybový moment	[N.mm]
$\pi$	Ludolfovo číslo	-
$d$	Průměr kruhové zkušební tyče	[mm]
$b$	Šířka	[mm]
$h$	Výška tyče obdélníkového průřezu	[mm]
$F_{max}$	Maximální dosažení zátěžná síla	[N]
$L$	Vzdálenost podpor	[mm]
$E_f$	Modul pružnosti v ohybu	[Mpa]
$\sigma$	Napětí v ohybu stanoveného průhyb	[Mpa]
$S$	Průhyb	[mm]
$\varepsilon$	Příslušná deformace ohybem	-
EN	Evropská norma	-
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci	-
ALCZ	Automotive Lighting Česká Republika	-

# Obsah

<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>10</b>
1. Materiály používané v osvětlovací technice automobilu.....	10
1.1. Polykarbonát APEC.....	10
1.2. Technologie zpracování PC vstřikováním.....	13
1.3. Technologie pokovování PVD.....	20
2. Recyklace technologického materiálu a neshodných dílů.....	25
2.1. Trendy v recyklování polymerů.....	25
2.2. Vlastnosti recyklátů.....	28
2.3. Vliv na pokovovatelnost dílců.....	30
<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>32</b>
1. Výroba zkušebních tělísek vstřikováním.....	32
2. Recyklace tělísek.....	34
3. Stanovení mechanických vlastností.....	36
- Rázová houževnatost Charpy.....	36
- Stanovení ohybových vlastností.....	40
4. Stanovení pokovovatelnosti.....	46
5. Stanovení indexu toku taveniny.....	50
<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>54</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>56</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>57</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>59</b>

# Úvod

Plasty jsou již od počátku 19. století velmi inovačním a perspektivním materiálem. Během dalších desetiletí prošly velkým vývojem. Díky novým variantám, modifikacím a stálému zlepšování techniky zpracování vznikalo stále více nových vlastností přizpůsobených určitým aplikacím a způsobům použití. Vývoj a následná výroba plastů přináší široké možnosti využití.

Plasty v řadě vlastností předstihly ostatní materiály. Vyznačují se malou hustotou, tlumícími schopnostmi, tvárností, snadným zpracováním a jsou cenově dostupné. Moderní plasty mají lepší mechanické vlastnosti, jsou odolnější proti povětrnostním vlivům a uchovávají si také vzhledové vlastnosti. Plasty lze zpracovat metodami vstřikování, vytlačování, válcování, svařování a lití. Jsou proto široce používaným materiálem v různých odvětvích a jejich spotřeba neustále stoupá.

Cílem této bakalářské práce je vyrobit zkušební tělíska vstřikováním na laboratorním vstřikovacím lisu Arburg a provést jejich opakovanou recyklaci. Objasnit výsledky vlivu počtu recyklačních cyklů na výsledné vlastnosti materiálu (vrubová rázová houževnatost, pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu, ITT a pokovovatelnost).

Jako materiál byl zvolen materiál APEC 1695 od firmy Bayer, který se převážně používá na výrobu krycích rámců a krycího skla světlometů vybraných evropských značek automobilů.

Práce byla realizována ve zkušebně Automotive Lighting s.r.o.. Zkušebna se zabývá převážně testováním materiálu, ze kterého se dále vyrábí dílce a následně hotové výrobky.

# Teoretická část

## 1. Materiály používané v osvětlovací technice automobilu

### 1.1. Polykarbonát APEC

Využití polykarbonátu v automobilovém průmyslu je značně široké. Používá se převážně na vzhledové dílce, jako je například krycí rám Škoda YETI ( obr.1 ) nebo krycí sklo světlometu. Je potřeba skloubit vhodné vlastnosti materiálu, jako je vysoká tepelná odolnost a velmi dobré mechanické vlastnosti, s příznivou cenou materiálu.

Dnešní automobilový průmysl vyžaduje materiály s vysokými užitnými vlastnostmi, s nízkou hmotností, možností tvarování do aerodynamického tvaru a především zajišťující bezpečnost cestujících. Všem těmto požadavkům polykarbonát vyhovuje. Boční zrcátka, přední světlomety, mlhovky, směrové ukazatele, dnes už i boční a zadní okna jsou vyrobeny z polykarbonátu a jejich tvar dává automobilu jedinečný vzhled. Polykarbonát se uplatňuje i v interiérech automobilů při výrobě přístrojových desek a bočních panelů.

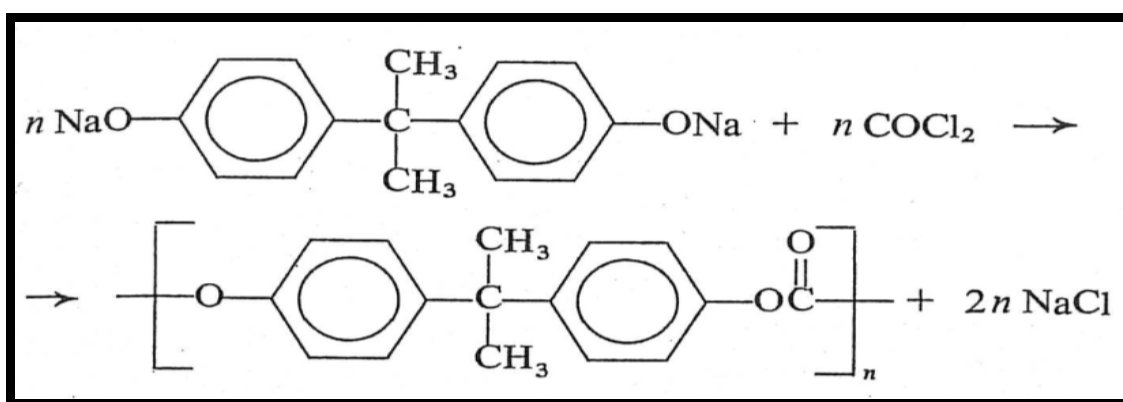


Obr. 1 Krycí rám předního světlometu Škoda YETI



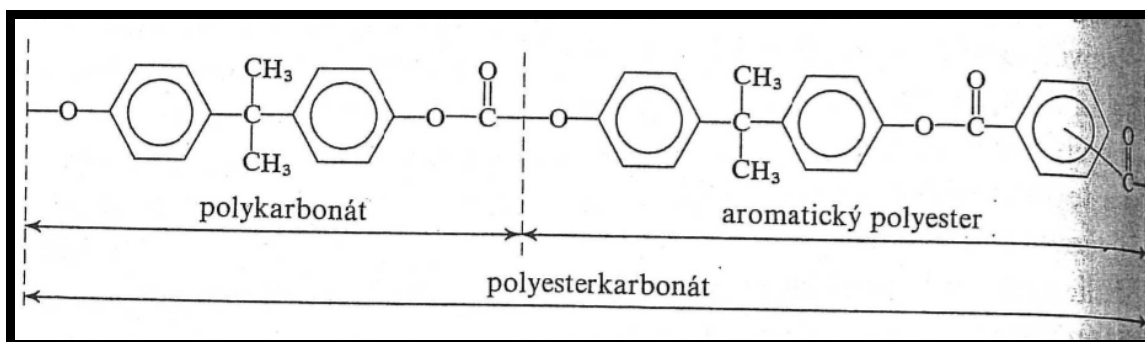
Světová spotřeba polykarbonátu je asi 3 milióny tun ročně a každoročně roste zhruba o 10 %, především díky vývoji nových typů PC a novým aplikacím. PC je kompatibilní s řadou dalších polymerů. Běžně se PC modifikuje pryží, která ještě zvyšuje rázovou houževnatost materiálu. Směs PC/PBT zlepšuje mechanické vlastnosti materiálu při nízkých teplotách a zlepšuje odolnost vůči povětrnostním vlivům.

Polykarbonát (polyester kyseliny uhličitě), se připravuje jednou ze dvou obecných metod: fosgenací nebo reesterifikací. Při fosgenaci probíhá reakce dianu s fosgenem za přítomnosti látek, které vážou uvolňovaný chlorovodík (vodného roztoku NaOH nebo pyridinu).



Obr. 2 Polykarbonát - vzorec chemické sloučeniny [1]

Aromatické polyestery neboli polyaryláty se v průmyslovém měřítku připravují mezifázovou nebo roztokovou polykondenzací sodné soli dianu nebo fenolftaleinu a chloridů kyseliny isoftalové nebo tereftalové, popř. i reesterifikací fenylesterů kyseliny isoftalové nebo tereftalové dianem v tavenině. Při polykondenzační přípravě polyesterkarbonátů se používá ještě fosgen.



Obr. 3 Polyesterkarbonát - vzorec chemické sloučeniny [1]

Polykarbonáty jsou transparentní materiály s propustností světla 85% a mají mimořádně vysoký index lomu ( $n_d^{20} = 1,587$ ). Jsou dobře rozpustné v chlorovaných uhlovodících a v cyklohexanu, těžce rozpustné v esterech, ketonech a aromatických uhlovodících. Pro vstřikování a vytlačování se používají typy s  $M_w$  20 000 až 40 000. Typy s  $M_w$  60 000 až 150 000 nejsou vzhledem k vysoké viskozitě taveniny vhodné pro zpracování z taveniny a zpracovávají se z roztoku (zejména pro lití fólií). Polykarbonáty vynikají vysokou rázovou houževnatostí i za velmi nízkých teplot, dobrou rozměrovou stabilitou až do 140°C, dobrými elektroizolačními vlastnostmi, vysokou mechanickou pevností (zvláště v tahu), nízkou absorpcí vody, odolností proti UV-záření, značnou stálostí proti oxidaci až do 120°C i dobrou odolností proti hydrolýze. Odolávají roztokům zředěných kyselin, uhličitanu sodného, mýdel a alkoholům. Nedostatečná je jejich odolnost vůči dlouhodobému působení vroucí vody a páry, amoniaku a aminům. Také dlouhodobé působení metanolu způsobuje jejich degradaci. [1]

Podobně jako ostatní polyestery, jsou polykarbonáty hygroskopické a budou absorbovat vlhkost z okolního prostředí. Tato vlastnost se často prokáže nepříznivým dopadem na fyzikální vlastnosti materiálu při zpracování ve vysoké vlhkosti. [11]

Polykarbonáty lze zpracovávat běžnými technikami používanými i u jiných termoplastů. Pro každé formování z taveniny je podmínkou dostatečná suchost materiálu termoplastů, protože polykarbonáty reagují v tavenině již se stopami vody za nízké molekulové hmotnosti.[1]

Aby se zajistilo udržení technických vlastností, vlhkost v granulátu by neměla přesáhnout 0,01%. Proto je sušení ve vysoušecím zásobníku sušičky, nebo pece s nucenou konvekcí nezbytné. Rosný bod u sušícího vzduchu by měl být nejméně -18°C. Sušení může být provedeno v mělké vaničce pomocí nucené konvekce. Čas vysoušení by měl být 3-4 hod při teplotě 130°C, nesmí však překročit teplotu  $T_g$ . [9]

Největší podíl polykarbonátů se zpracovává vstřikováním při teplotách 280 až 310°C. Vstřikováním se vyrábějí hlavně technické dílce určené pro použití za vyššího mechanického a tepelného namáhání. Trubky, tyče profily a tlusté fólie se zhotovují vytlačováním na jednošnekových strojích.

Polykarbonáty se dají dobře třískově opracovávat, svařovat horkým vzduchem (315°C) a lepit roztokem PC v metylenchloridu. [1]

Polykarbonáty se využívají k výrobě kompaktních disků. Polykarbonáty lze v tavenině mísit s termoplasty. Zvlášť významné jsou slitiny (blends) z PC a ABS, které představují zajímavou kombinaci vlastností obou polymerů (tvarové stálosti za tepla, vrubové houževnatosti a odolnosti proti UV-záření). Prosazují se většinou jako vnitřní součásti automobilů. [1]

Polyesterkarbonáty jsou tvarově stálé za tepla 152 až 182°C. Čisté polyaryláty mají sice nejvyšší tepelné odolnosti, ale vysoká viskozita způsobuje určité problémy se zpracováním. Naproti tomu zpracování polyesterkarbonátů je bezproblémové. Předpokladem pro zhotovování bezvadných dílů je pečlivé vysušení granulátů při teplotě min 130°C. [1]

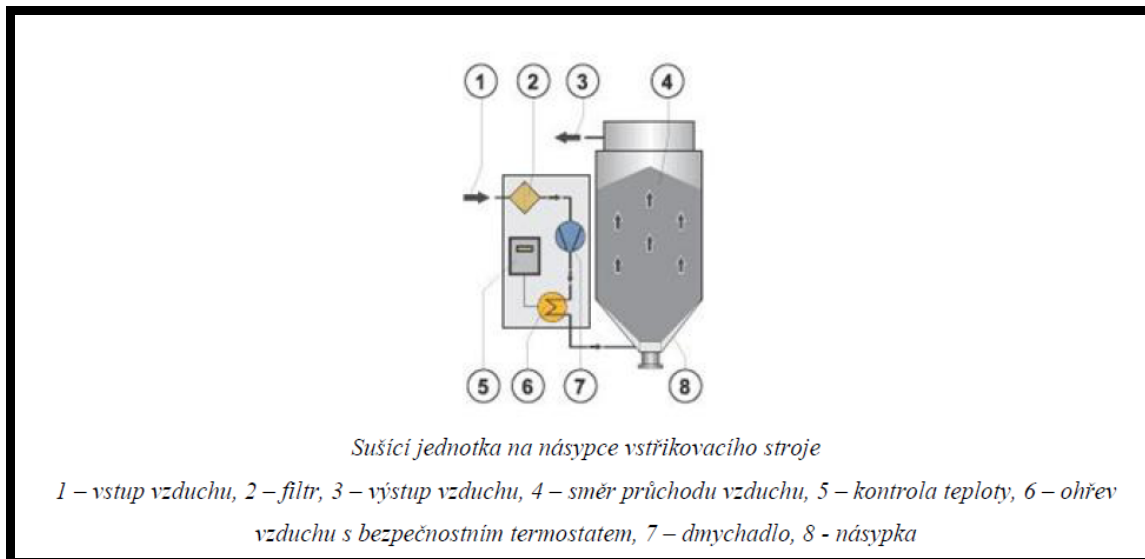
## **1.2. Technologie zpracování PC vstřikováním**

Před samotným vstřikováním materiálu by mělo dojít k sušení, to znamená zbavit se adsorbované vlhkosti, protože přítomnost vody zhoršuje mechanické a optické vlastnosti. Polární plasty s hydrofilními skupinami v makromolekule nejvíce absorbují vodu, mezi ně patří právě i polykarbonát. Materiál může být sušen v různých typech sušáren, nejčastěji jsou to skříňové sušárny s nucenou cirkulací. [2]

Optimální vrstva granulátu je 2 až 3cm, rozhodně by neměla být větší než 5cm. [2]

Jak již bylo zmíněno, materiál se temperuje na teplotu 120 až 130°C po dobu 2 až 4 hodin.

Sušení a navlhání jsou vratné děje a vysušený materiál je nutno chránit před vlhkostí v ovzduší. Do násypky zpracovatelských strojů se může dát jen takové množství materiálu, které se zpracuje asi do 30 minut. Násypky některých strojů jsou vyhřívány a teplota materiálu se udržuje na potřebné výši proudem teplého vzduchu. [3]



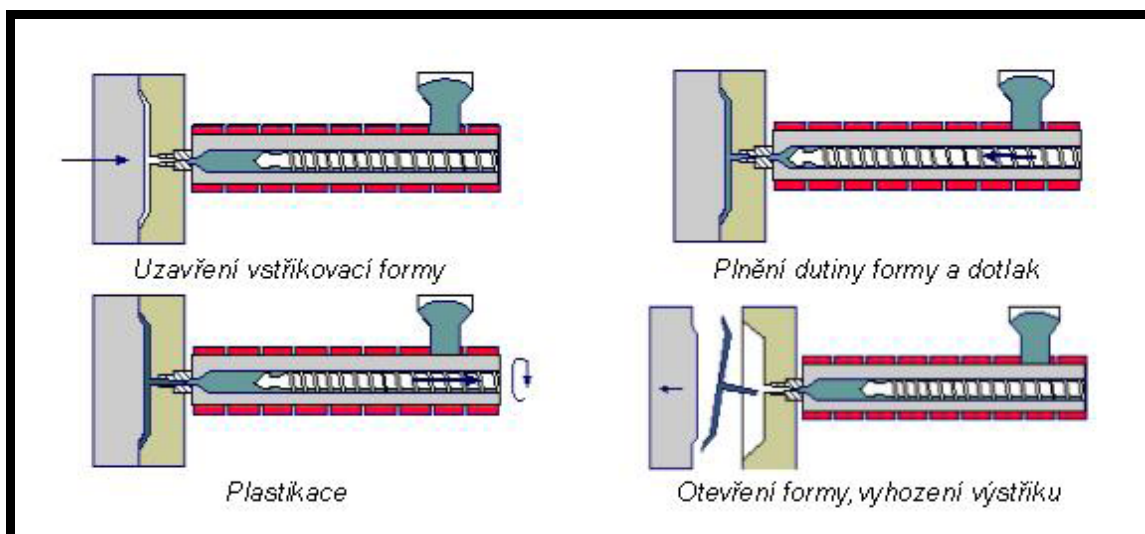
Obr. 4 Schéma sušící jednotky [3]

Vstřikování termoplastů představuje takový způsob tváření, při kterém je přesně určená dávka roztavené hmoty vstříknuta vysokou rychlostí z pracovní tlakové komory (válce) do uzavřené tvarové dutiny kovové formy, kde hmota ochlazením ztuhne ve finální výrobek. Potom se forma v dělicí rovině otevře, výrobek se vyjme a celý proces se po zavření formy opakuje. Vstřikování je proces přetržitý a cyklický. Zatímco tlaková komora má univerzální použití, účel vstřikovací formy je úzce specifický. [2]

Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností. Jejich tvar může být velice jednoduchý, ale stejně tak i značně složitý, a jejich hmotnost může činit třeba jen zlomky gramu, zatímco nejtěžší výrobky váží až několik desítek kilogramů. [2]

Vstřikovací proces probíhá na moderních strojích většinou plně automaticky, takže se dosahuje vysoké produktivity práce. K přednostem vstřikování rovněž patří vysoké využití zpracovávaného materiálu, které se často blíží 100%. Splňují se tak požadavky

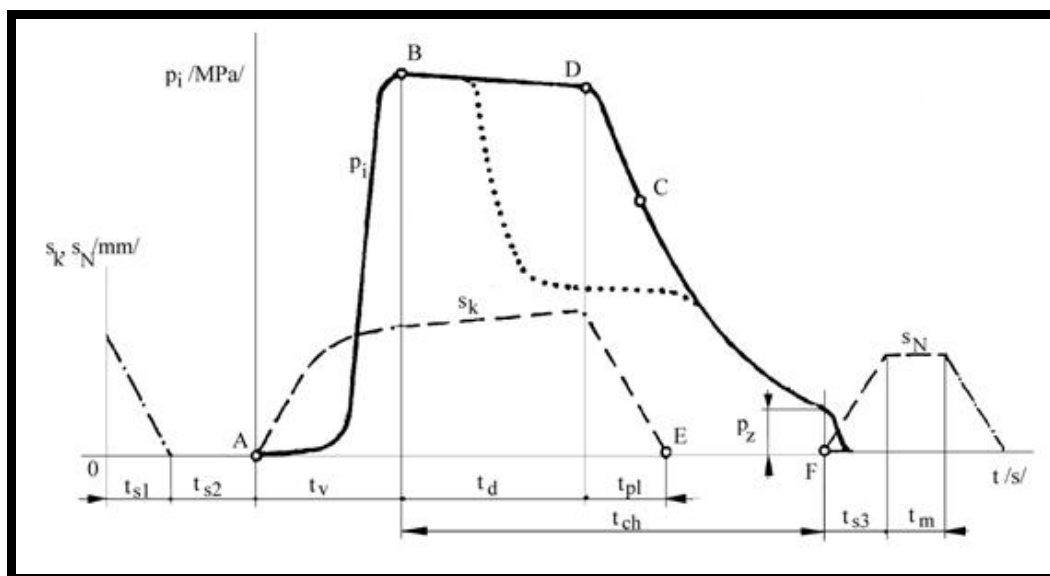
kladené na bezodpadovou technologii. Pořizovací cena strojního zařízení i vstřikovací formy je však značně vysoká. Technologie je proto vhodná pro velkosériovou a hromadnou výrobu. [18]



Obr. 5 Vstřikovací cyklus [2]

Postup vstřikování je následující: plast v podobě granulí je nasypán do násypky, z níž je odebírán pracovní částí vstřikovacího stroje (šnekem, pístem), která hmotu dopravuje do tavicí komory, kde za současného účinku tření a zahřívání plast taje a vzniká tavenina.

Tavenina je následně vstřikována do dutiny formy, kterou zcela zaplní a zaujme její tvar. Následuje tlaková fáze pro snížení smrštění a rozměrových změn. Plast předává formě teplo a s postupným ochlazováním získává výrobek konečný tvar. Potom se forma otevře a výrobek je vyjmut z dutiny formy a celý cyklus se opakuje. [3]



Obr. 6 Diagram průběhu tlaku vstřikovacího cyklu [2]

Vstřikovací cyklus však můžeme posuzovat i z hlediska zpracovaného plastu a vyjádřit jej jako závislost tlaku v dutině formy na čase. Tento tlak se někdy nazývá vnitřní tlak a značí se  $p_i$ , na rozdíl od vnějšího tlaku, kterým se myslí tlak vztažený na jednotku plochy průřezu šneku nebo pístu. Závislost tlaku  $p_i$  na čase vyjadřuje diagram průběhu tlaku v dutině formy během vstřikovacího cyklu. [2]

Plná čára na obrázku znázorňuje průběh tlaku, přerušovaná čára pohyb šneku a čerchovaná čára pohyb formy. [2]

Předpokládejme, že dutina formy je prázdná a forma je otevřená. V čase  $t = 0$  dostane stroj impuls k zahájení vstřikovacího cyklu. V časovém úseku  $t_{s1}$  se pohyblivá část formy přisune k pevné, forma se zavře a uzamkne. Tyto činnosti je nutné odlišit, protože na přisouvání formy se musí vynaložit jen malá přisouvací síla  $F_p$ , zatímco na uzamknutí je nutno vynaložit značně vyšší uzavírací sílu  $F_u$ , neboť musí být zaručena maximální těsnost formy. V časovém úseku  $t_{s2}$  se k formě přisune tavící komora. Úseky  $t_{s1}$  a  $t_{s2}$  představují tzv. doby činnosti stroje. V okamžiku A se dává do pohybu šnek v tavící komoře a začíná vlastní vstřikování roztavené hmoty do dutiny vstřikovací formy. V této fázi šnek vykonává pouze axiální pohyb, neotáčí se a vlastně plní funkci pístu. S nepatrným časovým zpožděním začne reagovat tlakové čidlo umístěné v dutině formy a zaznamenává rychlý vzrůst tlaku taveniny ve formě. [2]

Doba, během níž probíhá plnění dutiny formy, se nazývá doba plnění nebo doba vstřikování a značí se  $t_v$ . Po naplnění formy je tavenina v dutině ještě stlačena a tlak dosáhne maximální hodnoty. Tento děj je ukončen v bodě **B**. Jakmile je tavenina vstříknuta do dutiny formy, ihned začne předávat teplo formě a chladne. [2]

Tento proces probíhá až do otevření formy a vyjmutí výstřiku a tato doba se nazývá doba chlazení a je označena  $t_{ch}$ . V praxi se dělí na dobu chlazení při plném vstřikovacím tlaku a při klesajícím tlaku. Během chladnutí se hmota smršťuje a zmenšuje svůj objem. Pro zamezení tvorby staženin je nutno zmenšování objemu kompenzovat dodatečným dotlačením malého množství taveniny do dutiny formy. Tento úsek se nazývá doba dotlaku a značí se  $t_d$ . Dotlak může být po celou dobu  $t_d$  stejně vysoký jako maximální tlak  $p_i$  nebo se může po několika sekundách snížit a další chladnutí probíhá při sníženém tlaku. Doba dotlaku končí v bodě **D**, kdy začíná doba plastikace  $t_{pl}$  nové dávky plastu. Šnek se začne otáčet, pod násypkou nabírá granulovanou hmotu, plastikuje ji a vtlačuje do prostoru před čelem šneku. Současně ustupuje dozadu, přičemž musí překonávat tzv. protitlak neboli zpětný tlak. Ten se nastavuje tlakem hydraulické kapaliny ve válci za šnekem. Velikost protitlaku ovlivňuje dobu plastikace a tím i kvalitu prohnětení roztaveného plastu. Příliš vysoký protitlak by však mohl způsobit až degradaci plastu. Ohřev plastu během plastikace se děje jednak převodem tepla ze stěn válce, jednak frikčním teplem, které vzniká třením plastu o stěny komory a o povrch šneku a dále přeměnou hnětací práce šneku v teplo. Jestliže je tavící komora opatřena samouzavíratelnou tryskou, může plastikace probíhat i při otevřené formě. [2]

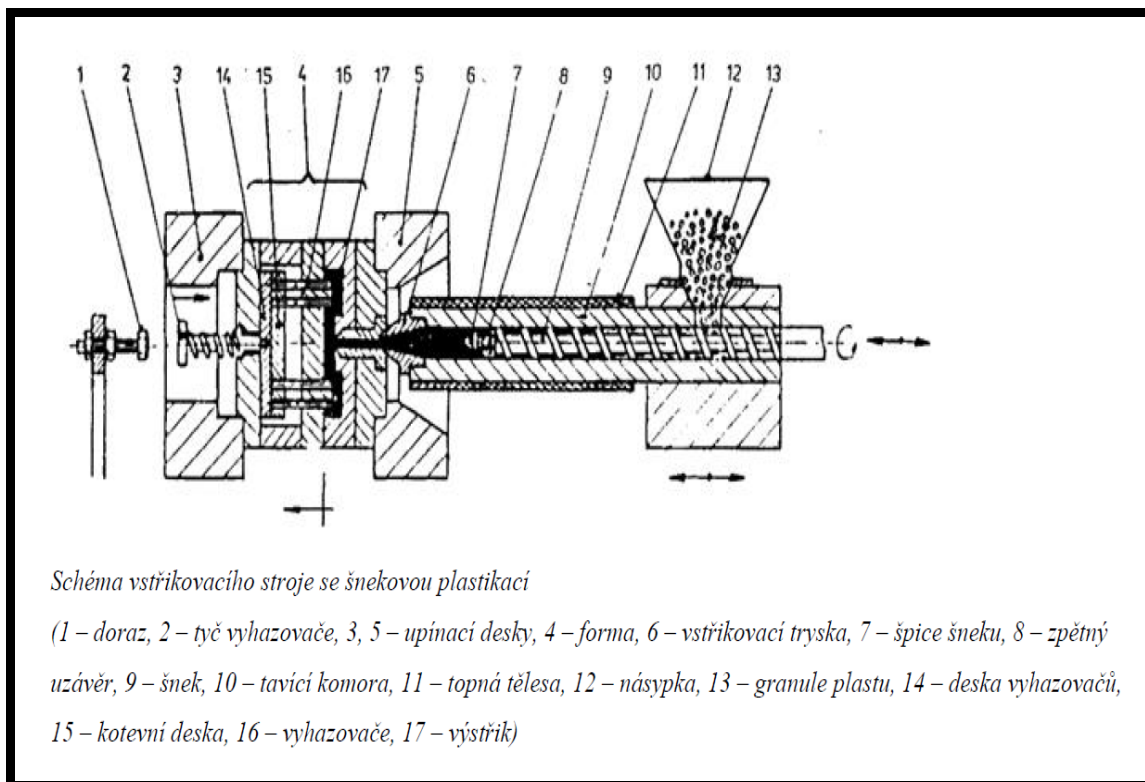
Z hlediska vlastností výstřiku je důležitý bod **C** označující okamžik zatuhnutí roztavené hmoty ve vtokovém kanálu. Vtokový kanál spojuje dutinu formy s dutinou tavící komory a dokud je hmota v kanálu ve stavu tekutém, může šnek ve fázi dotlaku ovlivňovat tlakové poměry v dutině formy. Zatuhnutím hmoty se však spojení mezi tavící komorou a dutinou formy přeruší a další prodlužování dotlaku se stane bezúčelné. Doba dotlaku tedy končí nejpozději v bodě **C**, kdy body **D** a **C** splynou v jediný, anebo může skončit ještě před úplným zatuhnutím vtoku. To má potom za následek rychlejší pokles tlaku ve formě, protože nepatrné množství taveniny může vlivem přetlaku v dutině formy vytéci zpět kanálem do tavící komory. Plastikace je skončena v bodě **E**, kdy šnek najede na koncový spínač, který dá impuls k zastavení jeho otáčivého pohybu. Následuje odsunutí tavící komory od formy  $t_k$ . K tomu dochází proto, že tavící komora

je vytápěna a hmotu v trysce je nutno udržet v roztaveném stavu, zatímco forma je chlazená a má podstatně nižší teplotu než tryska tavicí komory. Stykem s formou by se tryska ochlazovala a tím by se i snižovala teplota taveniny v trysce. Vzduchová mezera mezi komorou a formou, široká např. 50mm, zabrání přenosu tepla z trysky do formy. [2]

Během pokračujícího chlazení tlak ve formě dále klesá. Dříve se mělo za to, že ještě v okamžiku otevírání formy působí na hmotu malý tlak nazývaný zbytkový. Moderní poznatky však ukazují, že vlivem chladnutí a smršťování hmoty dojde v určité fázi chlazení k odlehnutí hmoty od líce formy, a proto nelze uvažovat o zbytkovém tlaku. Vlastnosti výstřiku jsou potom rozhodujícím způsobem určovány úrovní termodynamických veličin hmoty, to znamená její teplotou a tlakem, v okamžiku zatuhnutí vtoku **C**. Úroveň tlaku v tomto bodě lze ovlivnit programovaným průběhem dotlaku, jak je znázorněno tečkovanou čarou. Jestliže je tento tlak malý, hrozí nebezpečí, že na výstřiku vzniknou propadliny, příliš vysoký tlak je příčinou vysokých vnitřních pnutí, která mohou způsobit samovolné praskání výstřiků z křehkých plastů nebo deformace, jsou-li výstřiky z plastů houževnatých.

Po dokonalém ztuhnutí a zchladnutí výstřiku se forma otevře (bod **F**) a výstřik se z formy vyhodí najetím pohyblivé části formy na vyhazovací tyč. Z formy je pak vysunut vyhazovacími kolíky. Na tuto operaci je potřeba strojní doba  $t_{s3}$ . Je-li výstřik vyjímán z formy manipulátorem, je k tomu navíc vymezena manipulační doba  $t_m$ . Ta je určena i k případné další činnosti, např. ke vkládání kovových záložek do formy nebo k očištění formy a podobně. [2]





Obr. 7 Vstříkovací stroj [3]

Praktická část této bakalářské práce a výroba zkušebních tělísek byla zpracována na pístovém vstříkovacím stroji.

Rozdíl obou strojů je dán konstrukcí tavící komory. Pohyb plastu v komoře je u pístových strojů zajišťován pístem.

Jednou z nevýhod pístových vstříkovacích strojů je, že při změně plastu (např. barevný odstín u jednoho druhu plastu) nebo když se mění druh plastu, zůstává v komoře zbytek předešlého plastu a je nutno formu důkladně vyčistit. Jinak se může stát, že se na výrobku objeví odstíny předešlého plastu, nebo se materiál nespojí. Čištění formy realizujeme prostříknutím komory, avšak materiál z formy se nám mění v odpad.

K jediným přednostem pístových vstříkovacích strojů je jejich jednoduchost a z té plyne i nízká cena stroje.

### 1.3. Technologie pokovování PVD

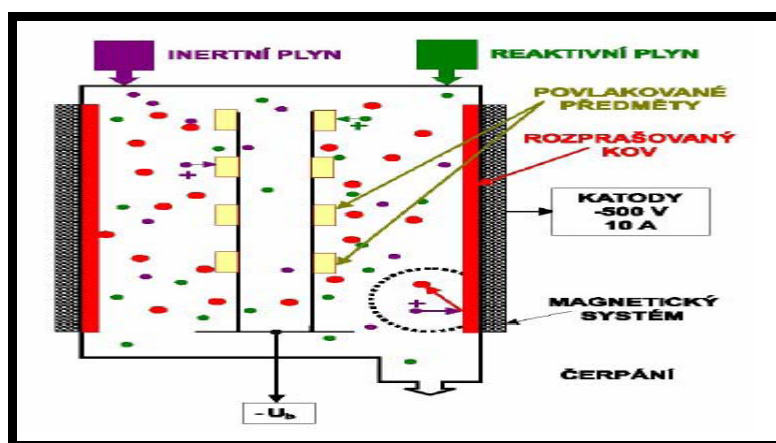
Technologie vytváření vrstev PVD (Physical Vapour Deposition= fyzikální napařování) je založena na odpaření nebo odprášení pevné látky v řízené atmosféře. Tato metoda se vyznačuje nízkými teplotami (pod 600°C, 350°C nebo i pod 180°C). [5]

Podmínky vzniku a vlastností vytvořených vrstev jsou velmi rozmanité. Povlaky vznikají při tlaku mezi 0,1 - 1 Pa ve vakuové komoře, do níž je vpouštěn pracovní plyn, např. argon nebo dusík. Podle způsobu získání kovových iontů rozlišujeme metodu odpaření nízkonapěťovým obloukovým výbojem (obloukové odpařování) nebo metodu odprášení ionty (magnetronové naprašování). [4]

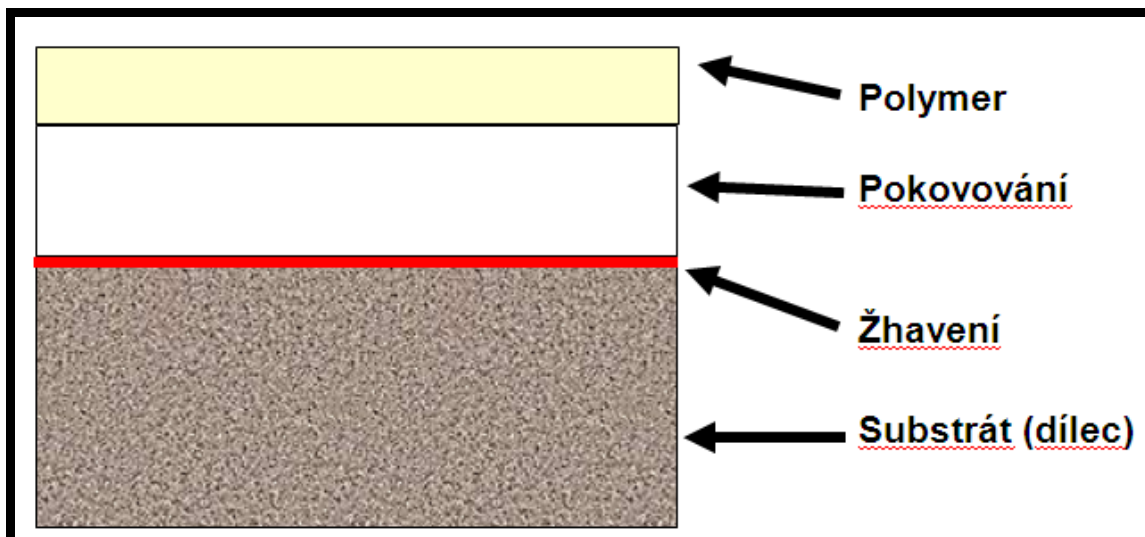
V bakalářské práci nám bylo umožněno pokovovat zkušební tělíska na naprašovacím či napařovacím zařízení. Zkušební tělíska byla pokovena na naprašovacím zařízení.

**Naprašování** (obr. 8) využívá elektrického výboje v plynné atmosféře komory, při kterém vznikají kationty (kladné ionty), které bombardují katodu z čistého kovu, na níž je připojen záporný pól elektrického napětí 0,5 - 5,0 kV.

Vysoká kinetická energie iontů uvolní z terče čistého kovu částice potřebného chemického složení (závisí na použitém kovu a složení plynné atmosféry), které se následně usazují na povrchu substrátu (obr. 9). [5]



Obr. 8 Naprašování [5]



Obr. 9 Složení vrstev [20]

Reálný proces:

Substrát (dílec) je při procesu žhavení ošetřen plazmou a zbaven nečistot na povrchu dílce. Následuje naprášení vrstvy hliníku, která je v dalším kroku procesu pokrytvrstvou polymeru, aby se zabránilo její oxidaci. [20]

### Vakuové pokovování

Protože se v procesech jedná o přenos materiálu od zdroje k substrátu ve formě jednotlivých atomů, je nezbytné provádět procesy za tlaku sníženého tak, aby nedocházelo k významným srážkám mezi přenášenými atomy a zbytkovou atmosférou.

**Pro úspěšný proces musí být tlak zbytkové atmosféry nižší než:**

$$1,0 \times 10^{-7} \text{ bar}$$

Jedná se tedy o jednu desetimilióntinu atmosférického tlaku.

**V případě, že vakuum není dostatečně kvalitní, nastávají vlivem kolizí následující nežádoucí jevy:**

- Vytvářejí se oxidy, nitridy a další sloučeniny s nežádoucími vlastnostmi.

- Není možné vytvořit dobrou hliníkovou vrstvu s vysokou odrazovou schopností při použití nekvalitního vakua.
- Počet srážek mezi naprašovaným materiálem a zbytkovými plyny se neúměrně zvětšuje. Výsledkem je rapidní snížení rychlosti růstu vrstvy.

Cílem pokovování je vytvořit odrazivou vrstvu s vysokou reflexivitou na povrchu termoplastového dílce. Vrstva musí kromě reflexivity splňovat další parametry:

- odolnost proti korozi
- dobrá adheze
- ochrana proti zamlžení
- zabarvení

#### **Příprava žhavením (obr. 10)**

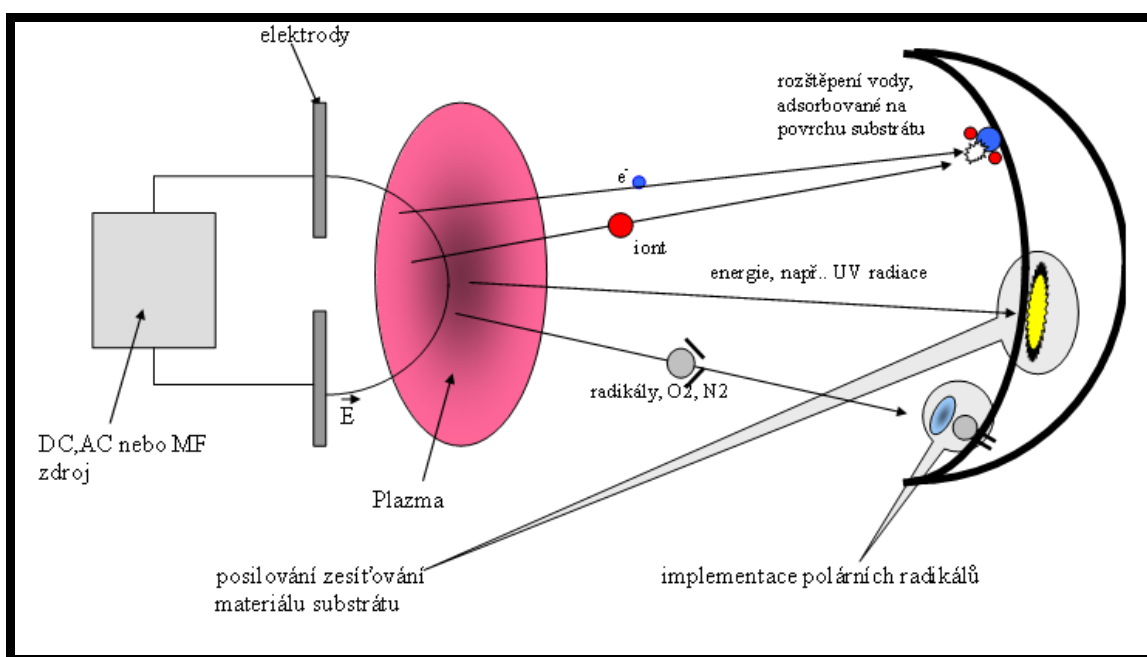
Cílem přípravy žhavení je připravit povrch substrátu pro následnou depozici (nanesení) hliníku a ochranné vrstvy. Povrch je bombardován ionty, elektrony a neutrálními částicemi, které způsobují omezení výskytu absorbentů na povrchu výrobku (zejména vody). Povrch je aktivován chemickými reakcemi plynových radikálů, které jsou vytvářeny plazmou. Výsledkem těchto procesů je:

- zvýšená adheze (přilnavost) nanesených vrstev
- zvýšená odolnost proti povětrnostním podmínkám
- zvýšený optický vzhled

Žhavení je limitováno tím, že nedokáže odstranit kontaminace jako:

- otisky prstů
- olej z procesu lisování
- separátory

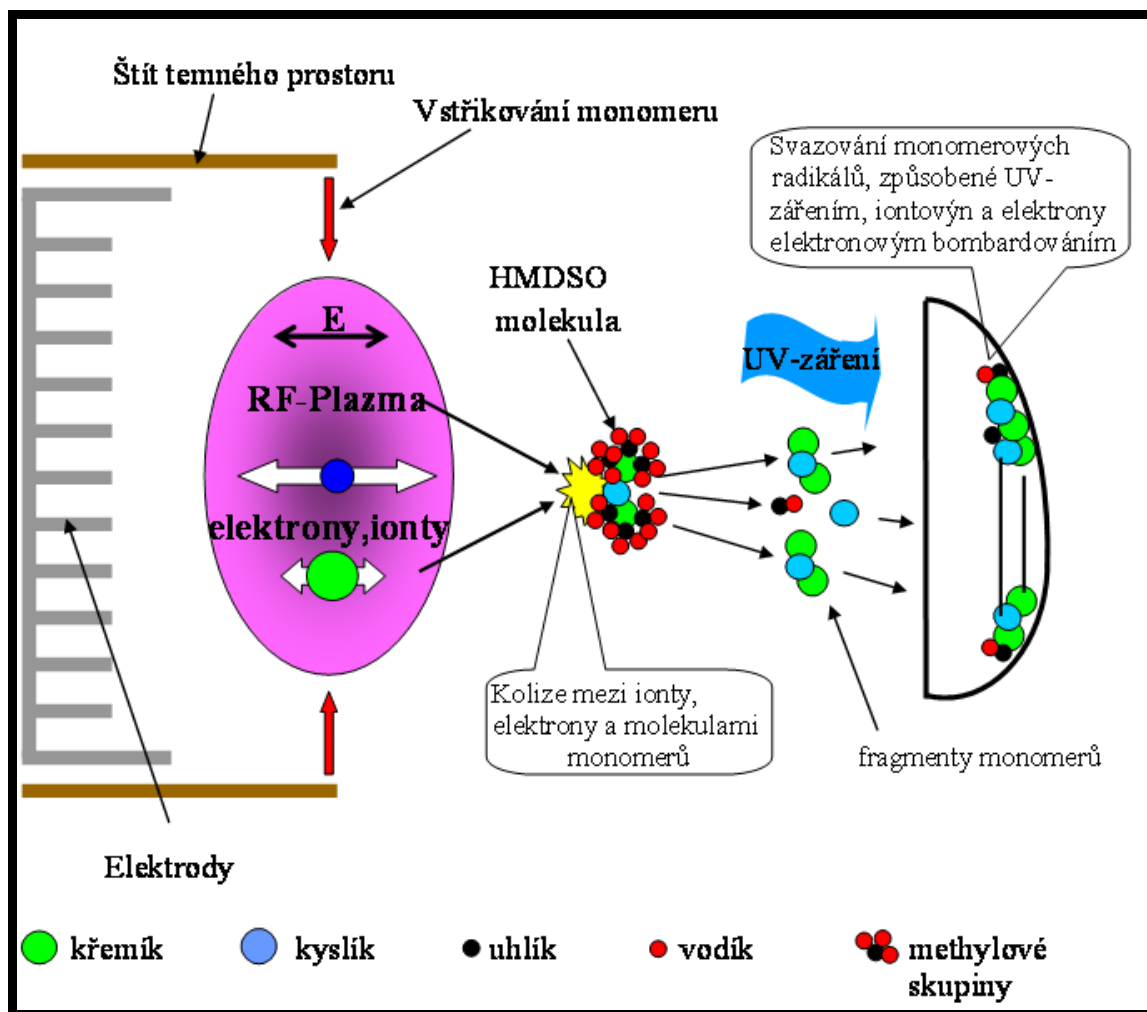
Povrch může být poškozen radikály plynů, UV-zářením nebo bombardováním částicemi. Je proto nezbytně nutné používat optimalizované parametry žhavení. [20]



Obr. 10 Proces žhavení [20]

### **Polymerace v procesu pokovování (obr. 11)**

Polymerace v procesu pokovování je plazmatický proces, při kterém je monomer HMDSO (hexametylendisiloxan) rozštěpen na jednotlivé částice a urychlen směrem k substrátu a stěnám komory a zde polymerován. Vytváří se tenká vrstva polymeru zabraňující oxidaci hliníku. Stupeň vytvrzení polymeru má mírně odlišné vlastnosti v závislosti na použitém plasmatu a tlaku procesu (různé stroje). Rovněž je různá rychlost růstu vrstvy. [20]



Obr. 11 Polymerace [20]

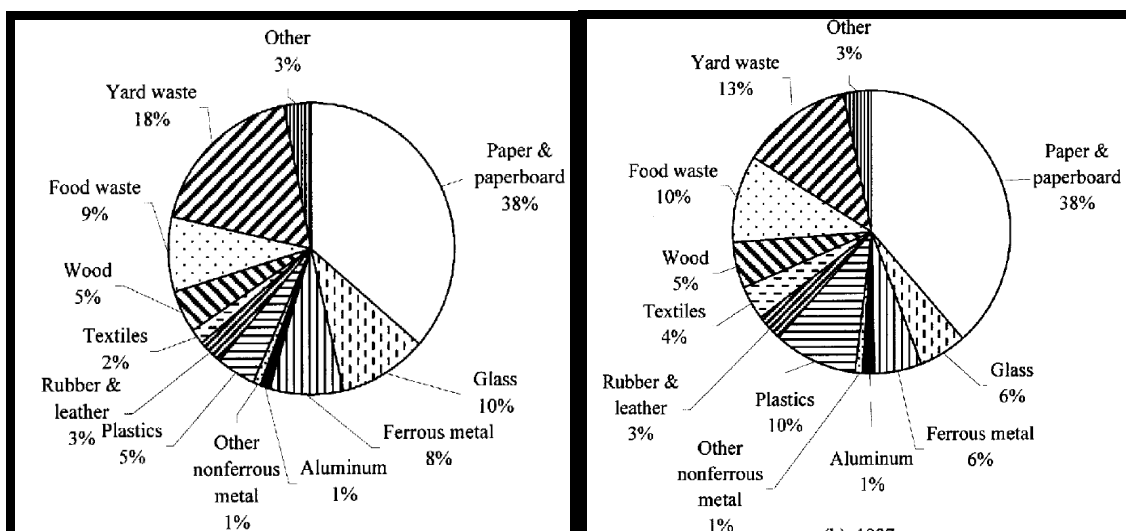
K nevýhodám metody PVD patří relativně složitý vakuový systém a požadavek pohybovat povlakovanými předměty tak, aby bylo zaručeno rovnoměrné ukládání povlaku po celém jejich povrchu. Tento požadavek souvisí s tzv. stínovým efektem, který u dané metody způsobuje, že na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařovaných částí, se vytváří nedokonalá vrstva povlaku, případně se povlak vůbec nevytvoří. [5]

## 2. Recyklace technologického materiálu a neshodných dílů

### 2.1. Trendy v recyklování polymerů

Celková míra recyklace plastů je obecně značně menší než recyklace kovů, skla a papíru. Částečně je to způsobeno kratší historií recyklace plastů. Je to také způsobeno z hlediska vyšší složitosti recyklace plastů, protože tato kategorie obsahuje velké množství různých materiálů, z nichž každá má své vlastní charakteristiky.

Mnohé recyklační závody se zaměřují na plastové obaly, nebo spíše na plastové lahve. [8]



Obr. 12 Recyklace materiálů v roce 1980[8] Obr. 13 Recyklace materiálů v roce 1997[8]

Mezi tři hlavní kategorie procesů recyklace plastů patří:

1. Mechanická recyklace
2. Chemická recyklace
3. Tepelná recyklace

**Mechanická nebo fyzikální recyklace** spočívá ve změně velikosti a tvaru plastických hmot, odstraňování znečišťujících látek, mísení přidávaných látek (v případě potřeby),

které mění vzhled recyklátu, ale nemění (alespoň ne ve velkém rozsahu) jeho základní chemickou strukturu. [8]

Společné kroky mechanické recyklace zahrnují broušení, odstranění lehkých nečistot ze vzduchu, praní, separaci pryskyřic, třídění, oplach, sušení. Mechanická recyklace je zdaleka nejčastější typ recyklace plastů. [8]

**Chemická recyklace** zahrnuje používání chemických reakcí k prolomení molekulární struktury plastu. Produkty pak můžou být vyčištěny a znovu použity k výrobě buď stejného, nebo příbuzného plastu.

Příkladem je glykolýza, proces používán k recyklaci PET. Kondenzace polymerů jako jsou PET, nylon a polyuretan jsou obvykle mnohem přístupnější než chemická recyklace polymerů, jako jsou polyolefiny, polystyreny a PVC. [8]

**Tepelná (termální) recyklace** využívá teplo k prolomení chemické struktury polymeru. Například polymer (nebo směs polymerů) je vystaven vysoké teplotě což způsobí rozklad struktury polymeru.

Tepelnou recyklaci lze aplikovat na všechny druhy plastů kromě polymerů jako jsou kondenzační polymery. Produktem tohoto způsobu recyklace je složitá směs produktů, i když vstupní surovinou je jeden polymer. Pokud jsou z termální recyklace sloučeniny čisté, mohou být použity jako vstupní surovina pro nové materiály. Pokud produkty obsahují více směsí, které nejsou snadno oddělitelné, používají se nejčastěji jako palivo. Dnes existuje poměrně málo podniků, které se zabývají termální recyklací plastů, ačkoli výzkum pokračuje. Německo má největší počet těchto zařízení díky svým požadavkům na recyklaci obalů z plastů. [8]

### **Separace a kontaminace plastů**

Pokud jsou plasty shromažďovány pro recyklaci, nejsou prakticky nikdy čisté a homogenní. Shromážděné materiály obsahují zbytky produktů, špínu, štítky a mnoho dalších materiálů. Často bude materiál obsahovat více než jeden základní polymer včetně zabarvení. Prospěšnost materiálu je větší, pokud tento materiál může být čistý. Proto je technologie pro čištění a oddělování nepotřebného materiálu důležitou součástí většiny systémů recyklace plastů. Elektromagnetická separace se používá k odstranění



kovů. Metoda spočívá v použití techniky, jako jsou vířivé proudy odlučovačů nebo elektrostatické odlučovače, které mohou být použity k odstranění kovů. [8]

## **Třídění**

Mezi tři hlavní kategorie procesů třídění patří:

1. Macrosorting
2. Microsorting
3. Molekulární třídění

Macrosorting se zabývá tříděním téměř celých objektů.

Microsorting se zabývá tříděním drcených nebo granulovaných plastů.

Molekulární třídění se zabývá tříděním materiálů, jejichž molekulární forma byla zcela přerušena, například rozpouštění plastických hmot. [8]

Macrosorting zahrnuje třídění automobilových komponentů. Mnohé z těchto třídění se stále provádí ručně pracovníky, kteří z dopravníků odebírají materiál a umísťují ho do příslušných nádob. Nicméně velké úsilí se vkládá do rozvoje více mechanizovaných prostředků třídění, aby byl tento proces úspornější a spolehlivější. Různá zařízení jsou nyní dostupná v třídění plastů podle jejich typu. Zařízení se typicky spoléhají na rozdíly v absorpci, nebo přenosu určitých vlnových délek elektromagnetického záření.

Zejména pro recyklaci spotřebičů, koberců a automobilových plastů, několik společností vyvinulo zařízení pro skenování plastu. Zařízení pracuje na principu infračerveného záření a jednotlivé druhy polymerů od sebe odlišuje pomocí porovnání spekter.

Triboelektrická technologie slouží k identifikaci plastů. Toto zařízení, které má snímač o velikosti malé baterky, bylo vyvinuto pro třídění automobilových plastů. Dodává se ve dvou základních typech, první identifikuje nylon, polypropylen, ABS a polyakrylát, druhý je konstruován pro jednoznačné třídění, jako je rozlišování mezi PE a PVC. [8]

Při microsortingu je využíváno separačních procesů, jako je například využití

hydrocyklonů, také se spoléhá především na rozdíly v hustotě materiálu při separaci. Řada dalších atributů byla rovněž použita jako základ pro microsorting systém, včetně rozdílů bodu tání. [8]

Molekulární třídění zahrnuje úplné rozložení struktury plastu. Takové systémy obvykle používají rozpuštění v rozpouštědlech s použitím buď jediného rozpouštědla o různých teplotách nebo kombinace rozpouštědel. Vzhledem k používání organických rozpouštědel a dodržování emisí bývají náklady na tento proces vysoké. [8]

## 2.2. Vlastnosti recyklátů

Recyklované plasty se používají v mnoha aplikacích, včetně automobilů, bytových doplňků, balení a stavebnictví. Recyklované materiály, včetně plastů jsou významnou obchodní záležitostí světového obchodu.

Recyklát polykarbonátu můžeme získat z materiálů jako jsou automobilové nárazníky, kompaktní disky, počítače a telefony. General Electric začal s odkupem polykarbonátu před několika lety a snažil se představit své myšlenky ve využití polykarbonátu v automobilovém průmyslu, počínaje obaly na jedno použití a konče v různých výrobcích automobilových součástek. GE rovněž zahájila pilotní program zpětného odkupu recyklačního materiálu v roce 1995. Firma Bayer Německo v roce 1995 postavila v Evropě první závod k recyklaci CD. Polykarbonát je zde odseparován od hliníkových povlaků. [9]

Polymer je v průběhu recyklace podroben tepelné, tepelně-oxidační a mechanicko-chemické degradaci. Tyto efekty mají nežádoucí vliv na povrch. Vlastnosti polymeru se se zvyšujícím počtem recyklací zhoršují. [10]

Čím je vyšší smykové namáhání a teplota při procesu recyklace, tím více se zhoršují vlastnosti polymeru. [13]

Přesto je ale recyklace PC výhodná, neboť ceny vstupních surovin jsou vysoké, zvláště u bisfenolu A. Degradací reakce PC a jejich vliv na mechanické vlastnosti byly

studovány různými autory, kteří se ve svých pracích soustředili na hydrolytickou degradaci [14], na vliv teploty regranulačního zařízení na výsledné vlastnosti [11] a na stanovení závislosti molekulové hmotnosti a rázové houževnatosti. [12]

<b>Table 6-45 Properties of 100% PC regrind</b>				
Material: Property	Regrind History			
	Virgin	1st	2nd	3rd
High molecular weight: Natural				
Melt flow rate (g/10 min)	4.6	4.9	5.0	4.9
3.2 mm izod notched impact (J/m)	956	945	935	950
Yellowness index	2.8	4.8	7.3	10.1
Low molecular weight: Natural				
Melt flow rate (g/10 min)	15.2	15.2	16.2	16.0
3.2 mm izod notched impact (J/m)	820	880	810	820
Yellowness index	1.8	3.5	5.1	6.6
Flame-retardant: Natural				
Melt flow rate (g/10 min)	11.7	12.2	13.0	14.9
3.2 mm izod notched impact (J/m)	110	105	95	100
Yellowness index	3.8	5.0	6.8	8.5

Tabulka 1- Srovnání materiálových vlastností recyklátů [9]

Tabulka 1 srovnává vlastnosti recyklátu od originálního materiálu až po třetí recyklát. Tabulka srovnává vlastnosti PC s vysokou molekulovou hmotností oproti nízké molekulové hmotnosti. Jedním z ukazatelů je index toku taveniny, vrubová rázová houževnatost podle IZOD a dále index žlutosti. Jak je zde vidět, s recyklačními cykly se zhoršují technologické, mechanické, ale i optické vlastnosti. Můžeme zde vidět, že rozdíl vlastností je i v materiálu s vysokou molekulární hmotností oproti materiálu s nízkou molekulární hmotností.

POČET RECYKLACÍ	VRUBOVÁ RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST [kJ/m <sup>2</sup> ]
0	N
1	13,5± 0,8
2	10± 1,6
3	4,5±1,2
4	2,1± 1,4

Tabulka 2- Srovnání vrubové rázové houževnatosti [10]

Tabulka 2 srovnává vrubovou rázovou houževnatost. 0. recyklát (nerecyklovaný materiál) nelze přerazit. S následujícími recyklačními cykly vrubová rázová houževnatost klesá.

Podobně byl zkoumán vliv vlhkosti na výsledné vlastnosti recyklátu. [15] Long, Sokol, Shea a kolektiv potvrdili, že vlhkost zhoršuje výsledné vlastnosti recyklovaného materiálu. [16]

Všeobecně se dá říci, že evidentně se zvyšujícím počtem recyklací klesají mechanické vlastnosti. O tom, jak velká bude změna těchto vlastností, rozhoduje především teplota, vstřikovací rychlost a tlakový profil vstřiku. Přítomnost aditiv a také vlhkost mají svůj významný podíl na výsledných vlastnostech materiálu.

### 2.3. Vliv na pokovovatelnost

Opakovaná recyklace a s ní spojená degradace materiálu nemusí mít vliv na pokovovatelnost zkušebních tělísek. Avšak předpokládá se, že vlivem opakování recyklačních cyklů dojde ke zhoršení povrchu zkušebních tělísek, který bude mít negativní vliv na pokovovatelnost. Nanášená vrstva je okolo 50 – 100 nm, což je vrstva tak tenká a dokonale kopírující povrch, že nezakryje sebemenší vady podkladového plastu, na který je nanášena. Naopak některé vady, které nejsou před pokovením příliš výrazné (kontrastní) se ještě díky lesklému povrchu zvýrazní. Další změna, ke které může na povrchu výlisku dojít, může být zmatnění dílce. Pokud struktura plastu nebude

dokonale kopírovat povrch dílce a tedy výsledný povrch nebude dokonale jednolitý, nevytvoří se po pokovení dokonale zrcadlový lesk. Jako další vlivy pro výsledný dokonale pokovený povrch může být zhoršující se odformovatelnost výlisku, při které se povrch může také poškodit, či vyšší tekutost materiálu, která může být další příčinou zhoršení povrchu výlisku.

Jako další všeobecně platí, že manipulace s nepokovenými dílci je stejně důležitá, jako s pokovenými, protože na dílcích po pokovení bude vidět každý otisk či rýha. Tedy se samotnými výlisky i pokovenými dílci je třeba manipulovat velmi opatrně a nejlépe v bavlněných rukavicích nezanechávající otisky. Dílců se musíme dotýkat co nejméně a za nevzhledové části.

Dalším vlivem na pokovovatelnost je tvar dílce. Pokud je tvar dílce příliš hluboký, nemusí dojít k dostatečnému pokrytí dílce vrstvou hliníku. V bakalářské práci se tímto vlivem nemusíme zabývat, protože naše zkušební tělíska mají plochý tvar.

Samotnou pokovovatelnost (kvalitu vrstvy a její barvu) ovlivňují hlavně procesní parametry (síla vrstvy, rychlost naprašování), provozní stav stroje (čistota komory, vakuum) kvalita substrátu (podmínky lisování, materiál, skladovací čas) a podmínky prostředí (čistota-prach atd., vlhkost).

Poslední z vlivů ovlivňující vzhled povrchu pokovení je nanášená ochranná polymerní vrstva, která brání oxidaci hliníku ve volném prostředí. Přestože je tato vrstva čirá a ve vrstvách okolo 20 nm, může při vyšších vrstvách způsobovat zežloutnutí povrchu pokovení na výlisku.

# Praktická část

## 1. Výroba zkušebních tělísek vstřikováním

Tělíška určená k recyklaci byla vstříknuta na laboratorním vstřikovacím pístovém lisu typu Arburg (obr. 14).

Předsušený materiál byl nasypán do vstřikovací hlavy (do násypky), odkud byl vtlačován pístem do vytápěného válce (obr. 15). Materiál je roztaven a vstříknut do temperované formy (obr. 16).

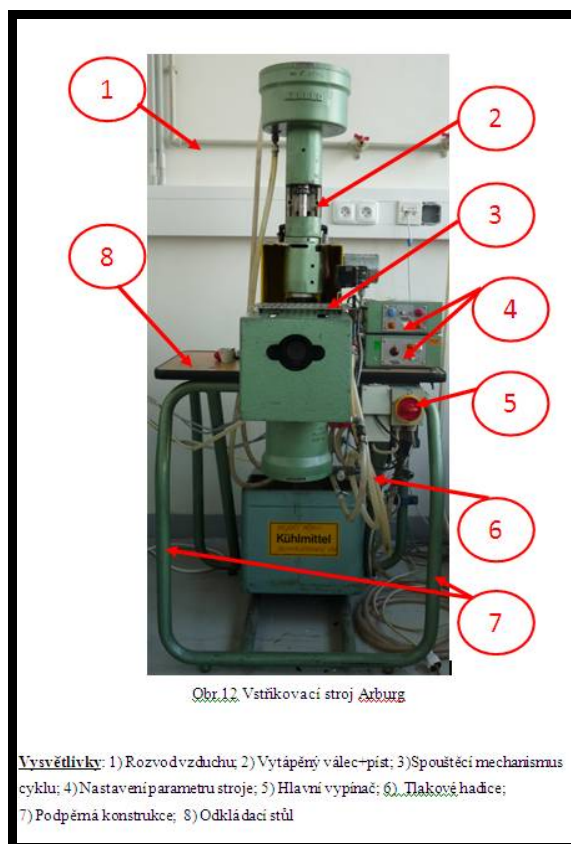
Parametry stroje a formy byly nastaveny na (obr. 17):

Vstřikování 20 sek

Chlazení 55 sek

Teplota válce 340-350°C

Teplota formy 110-120°C



Obr. 14 Laboratorní vstřikovací lis Arburg



Obr. 15 Vytápěný válec+ píst



Obr. 16 Forma



Obr. 17 Nastavení parametrů stroje

Princip činnosti pístového vstřikovacího stroje je následující:

Plast v podobě granulí se nasype do materiálové násypky. V hrdle jejího ústí se pohybuje pomocný dávkovací píst, jehož pohyb je spojen s hlavním tj, vstřikovacím pístem. Při současném pohybu obou pístů sune dávkovací píst před sebou granulát. Granulát obvykle spadne nejprve na povrch hlavního pístu a teprve při dalším cyklu spadne před čelo hlavního pístu. Hlavní píst jej pohybem vpřed stlačuje a přesunuje do vytápěných částí tavicí komory, kde plast taje a dalším pohybem je tavenina vstříknuta vtokovým kanálem do dutiny vstřikovací formy. [2]

## 2. Recyklace tělísek

Vlastní proces recyklace byl prováděn ve čtyřech fázích.

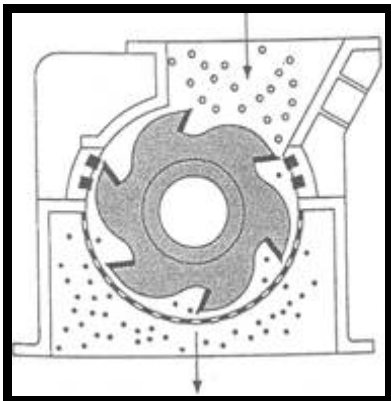
- a) Vlastní drcení materiálu probíhalo na drtícím zařízení (obr. 18), ze kterého byly získány granule.



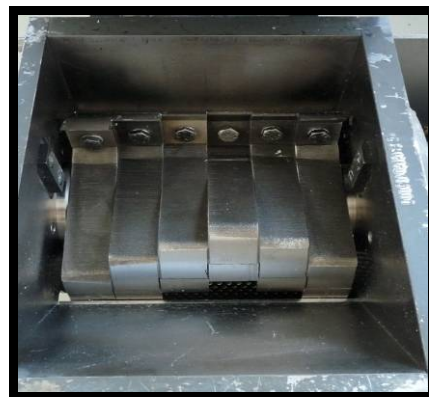
Obr. 18 Drtící zařízení Zerma



Zařízení pracuje jako nožový mlýn (obr. 19). Uvnitř stroje je na rotoru uchycena nožová hlava (obr. 20), která drtí (seká) materiál na drobné částice. Pod nožovou hlavou se nachází síto (obr. 21) s oky a dále sběrný koš na rozdrčený materiál (obr. 22)



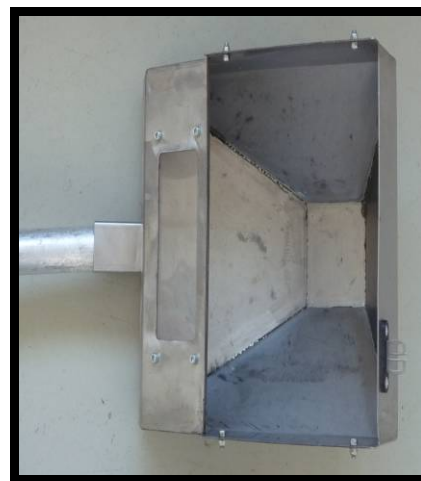
Obr. 19 Nožový mlýn [4]



Obr. 20 Nožová hlava



Obr. 21 Síto drtícího zařízení



Obr. 22 Sběrný koš

Rozdrčené granule z drtícího zařízení byly protlačeny hlavou vstřikovacího lisu, která simulovala vytlačovací proces při recyklaci.

b) Poté byl opět recyklát rozdrčen v drtícím zařízení.

- c) Následovalo sušení granulí v sušícím zařízení (obr. 23) při teplotě 130°C a čase 3hodiny.



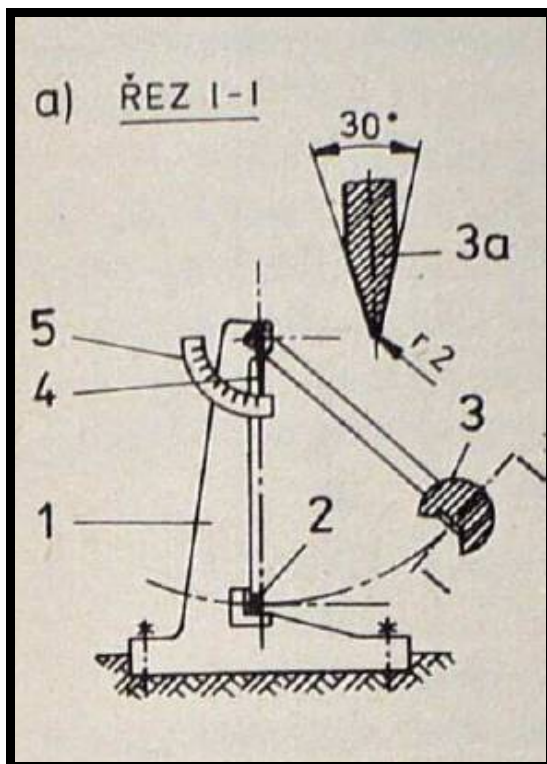
Obr. 23 Sušící zařízení WTB BINDER

### 3. Stanovení mechanických vlastností

#### Rázová houževnatost Charpy

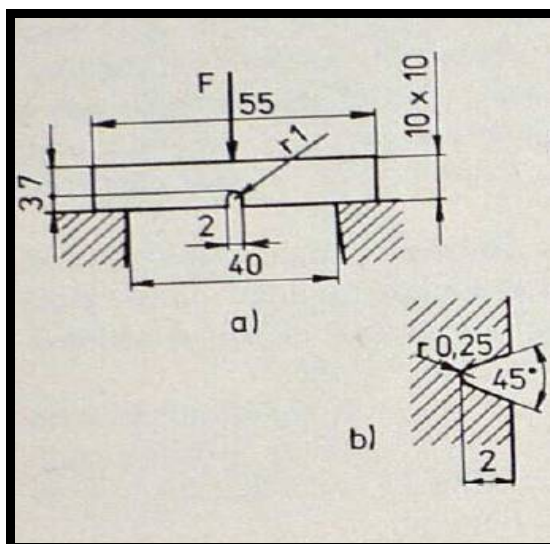
Zkouška spočívá v přeražení zkušební tyče jedním rázem kyvadlového kladiva a v určení nárazové práce, která se při tom spotřebovala. Tato práce, vztažená na průřez tyče v místě přeražení, vyjadřuje houževnatost materiálu. Zkušební tyče jsou při přeražení uloženy na dvou podporách (zkouška podle Charpyho) (Obr. 24). Zkouška podle Charpyho se užívá v Evropě a je normována i u nás. Zkušební tyče pro Charpyho zkoušku užívají jednak U-vrubu, jednak V-vrubu. Protože u tyčí různých rozměrů ani při zachování geometrické podobnosti není v kořenu vrubu stejná napjatost, nelze srovnávat výsledky dosažené na tyčích různých rozměrů, tím méně na tyčích různého typu nebo s různými vruby. Tvar, rozměry tyčí i podmínky zkoušky jsou normovány. ČSN 42 0381-78 připouští tyče několika šířek při jednotné výšce a délce (základem je tyč 10 x 10 x 55 mm) s U-vrubem o hloubce 5,3 nebo 2 mm (obr. 25) popřípadě s

V-vrubem hloubky 2mm. Změřená nárazová práce K se označuje podle užitého vrubu buď KU, nebo KV. Zjišťuje se na kyvadlovém kladivu nebo padostroji (Amsler). [6]



a) schéma Charpyho kladiva: 1 – rám; 2 – zkušební tyč; 3 – kyvadlové kladivo; 3a – tvar bříty kladiva; 4 – vlečná ručka; 5 – stupnice;

Obr. 24 Charpyho kladivo [6]



Obr. 25 a) Zkouška typu Charpy, zkušební tyč s U-vrubem podle ČSN

b) V-vrub podle ČSN [6]

Vrubová houževnatost  $K_C$  se při Charpyho zkoušce stanoví jako nárazová práce  $K$  vztažená na plochu  $S_0$  tyče pod vrubem:

$$K_C = K/S_0 \text{ [J.cm}^{-2}\text{]}$$

Označí se podle typu vrubu buď  $K_{CU}$ , nebo  $K_{CV}$  s dalšími údaji o zkoušce (např.  $K_{CU}$  100/2/5 značí kladivo o energii 100J, vrub hloubky 2 mm, tyč šířky 5mm).

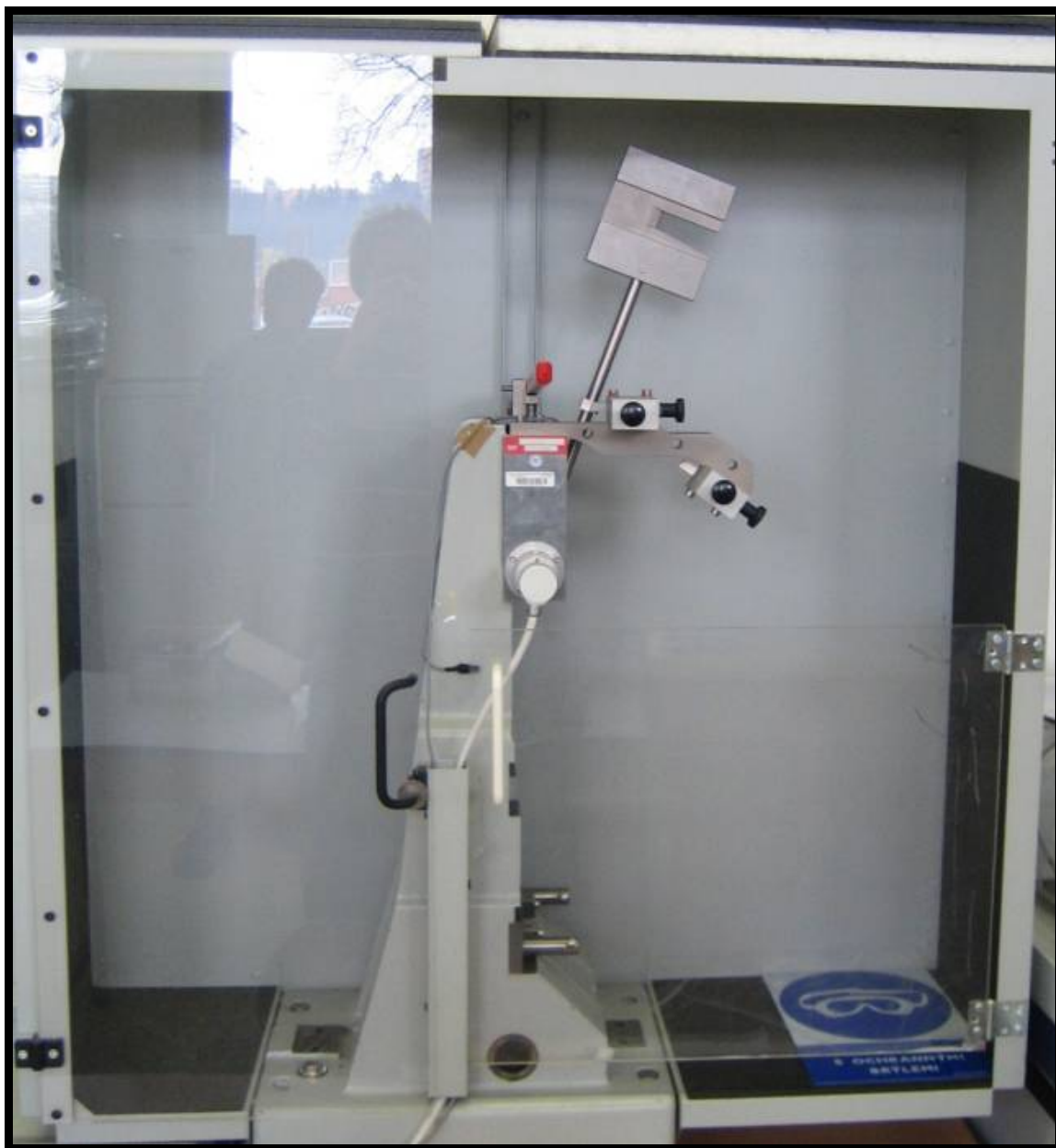
Běžné zkoušky probíhají při teplotě místnosti. Pro součásti a konstrukce, které mají pracovat i za snížených teplot, je však významný průběh vrubové houževnatosti v širším teplotním rozmezí.

Ke zkoušce se užívá kyvadlových kladiv s maximální energií od 5 do 300J. Kladiva s nejmenší energií se uplatňují ke zkoušení látek s malou houževnatostí (některé plasty, keramika). Protože charakter porušení i hodnota  $K_C$  závisí i na rychlosti zatěžování zkušební tyče, je předepsána standardní dopadová rychlost kladiv 4 až 7 m/s. Moderní kladiva s dalším vybavením (tzv. instrumentovaná kladiva) zachycují celý průběh síly v závislosti na deformaci tyče a vyhodnocují energii příslušné počátku nestabilního šíření trhliny z vrubu. Tím poskytují další cenné údaje o lomovém chování materiálu při dynamickém zatěžování. [6]

## **VLASTNÍ ZKOUŠKA:**

Zkouška byla prováděna na přístroji: ZWICK 5113 Zwick Roell. (obr. 26)

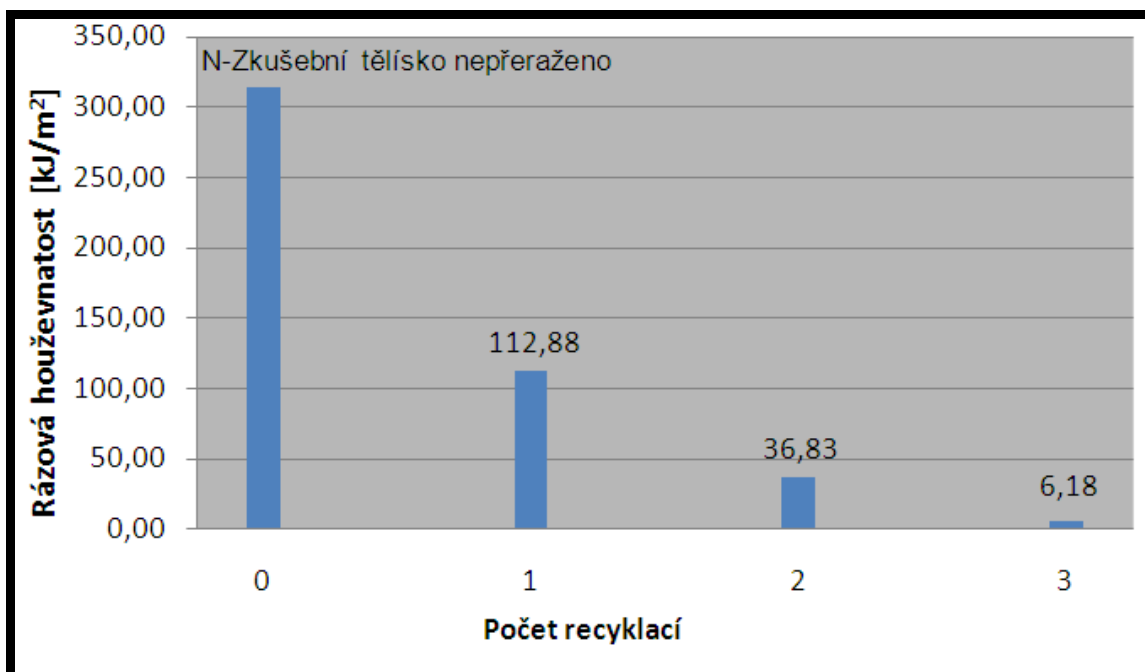
Při zkoušce byla použita přerážející kladiva s energií rázu 15kJ a 5kJ.



Obr. 26 Přístroj Zwick Roell

## VÝSLEDEK ZKOUŠKY:

### -Rázová houževnatost



Graf 1: Rázová houževnatost

Z grafu č. 1 je patrné, že nejvyšší rázová houževnatost je u 0. recyklátu - nerecyklovaného materiálu (zkušební tělísko nebylo přeraženo) a s dalšími recykláty rázová houževnatost exponenciálně klesá.

### Stanovení ohybových vlastností

Při ohybové zkoušce se jedná o namáhání tlakem a tahem současně. Napětí je v principu rozloženo tak, že v horních vrstvách je tahové, směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové. [2]

Zkouška se užívá pro hodnocení křehkých materiálů a pro svařované a spájené spoje. Pro houževnaté materiály, u nichž k porušení ohybem nedochází, se zkouška neuplatňuje. Při zkoušce se zkušební tyč (většinou kruhového průřezu) uložená na dvou podporách zatěžuje uprostřed plynule rostoucí silou až do porušení. Zjišťuje se pevnost

v ohybu  $R_{m0}$  a průhyb tyče, které odpovídají porušení. Pro pevnost v ohybu, která se rovná napětí krajního vlákna při dosažení maximální síly, platí [6]:

$$R_{m0} = M_{0\max} / W_0 \text{ [MPa]}$$

Kde  $W_0$  je modul průřezu - pro kruhový průřez je  $W_0 = \pi d^3 / 32 \text{ [mm}^3\text{]}$ ,

- pro obdélníkový je  $W_0 = b \cdot h^2 / 6 \text{ [mm}^3\text{]}$

$M_0$  - ohybový moment.

maximální ohybový moment  $M_{0\max} = F_{\max} \cdot L / 4 \text{ [N.mm]}$

Přitom  $d$  - průměr kruhové zkušební tyče [mm]

$b$  - šířka [mm]

$h$  - výška tyče obdélníkového průřezu [mm]

$F_{\max}$  - maximální dosažená zátěžná síla [N]

$L$  - vzdálenost podpor [mm]

Zkoušky ohybem se zpravidla užívají u šedé litiny, kde se z průhybu tyče usuzuje i na houževnatost. Rozměry odlitých zkušebních tyčí se volí podle směrodatné tloušťky stěny odlitku (ČSN 42 0361-83). Tyče jsou neobrobené, pouze očištěné. Vzdálenost podpor bývá 20d. [6]

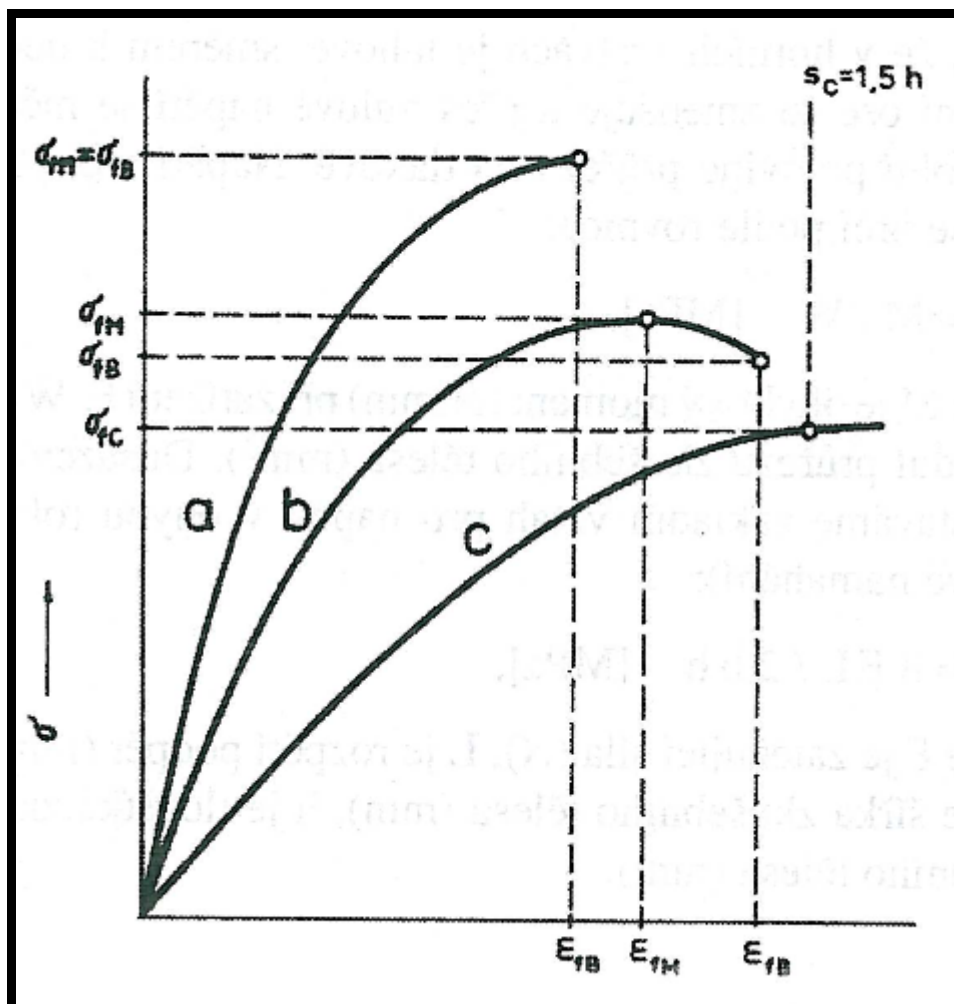
Modul pružnosti v ohybu  $E_f$  se vypočítá podle rovnice:

$$E_f = \sigma_2 - \sigma_1 / \varepsilon_2 - \varepsilon_1 = \Delta \sigma / \Delta \varepsilon \text{ [MPa]},$$

kde  $\sigma_1$  je napětí v ohybu stanoveného pro průhyb  $S_1$ ,  $\sigma_2$  je napětí v ohybu stanovené pro průhyb  $S_2$ . Průhyb představuje vychýlení [mm] plochy tělesa ze své původní polohy uprostřed rozpětí obou podpor. [2]



Výsledkem ohybových zkoušek jsou ohybové křivky napětí (obr. 27) – průhyb (deformace). Příklady průběhu obecných plastů (a- plasty se zlomí před mezí kluzu; b- plasty se zlomí před dosažením smluvního průhybu; c- plasty nemají mez kluzu a nezlomí se před dosažením smluvního průhybu, to je 1,5 násobku tloušťky tělesa) jsou uvedeny na následujícím obrázku. [2]



Obr. 27 Obecné ohybové křivky [2]

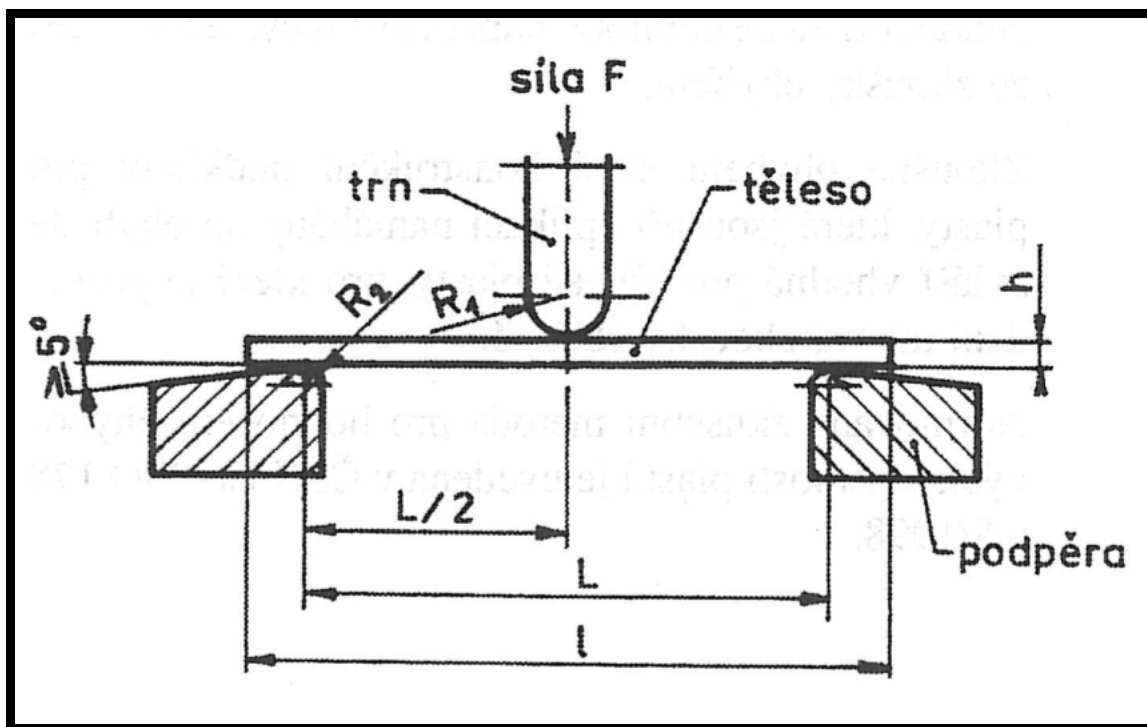
Podstatou zkoušky je, že zkušební těleso volně položené na dvou podpěrách je uprostřed mezi nimi za definovaných podmínek krátkodobě zatěžováno až do svého rozlomení nebo do dosažení stanovené hodnoty. [2]

Zkušební tělesa ve tvaru hranolu musí vyhovovat specifickým požadavkům příslušné materiálové normy. Platí podmínka, že poměr délky a tloušťky zkušebního tělesa musí být v poměru  $20 \pm 1$ . Přednostní typ zkušebního tělesa má rozměry: délka  $80 \pm 2$  mm,



šířka  $10 \pm 2$  mm a tloušťka  $4 \pm 2$  mm. V každém směru orientace se zkouší nejméně 5 těles. [2]

Vlastní uspořádání ohybové zkoušky může být různé, nejčastěji se používá tzv. tříbodový systém (obr. 28), který ukazuje následující obrázek.



Obr. 28 Ohybová zkouška tříbodový ohyb [2]

Zkušební těleso je umístěno na dvou podpěrách vzdálených od sebe v určité vzdálenosti. Rozpětí podpěr je nastavitelné, poloměr zatěžovacího trnu je  $5 \pm 0,1$  mm, poloměr podpěr je podle tloušťky tělesa  $2 \pm 0,2$  mm nebo  $5 \pm 0,2$  mm. Síla, způsobující průhyb tělesa, působí uprostřed mezi podpěrami. Nová konstrukce průtahoměrů umožňuje umístit je i na více místech zkušebních těles a měřit tak deformaci v různých místech. To umožňuje stanovit mez kluzu v ohybu, což je takové napětí, které způsobí první známky průtažnosti (trvalé deformace) vnější vrstvy namáhané na tah. [2]

Zkušební těleso se umístí symetricky na obě podpěry a plynule se uprostřed mezi nimi zatěžuje. Rychlost pohybu mezi podpěrami a zatěžovacím trnem se pohybuje v rozmezí od 1 do 500 mm/min. V průběhu zkoušky se zaznamenává síla (napětí) působící na těleso a velikost odpovídajícího průhybu zkušebního tělesa. [2]

Výsledkem zkoušky jsou ohybové křivky, síla (napětí) - průhyb, z kterých se vyhodnocují všechny potřebné charakteristické hodnoty (napětí, průhyby, deformace) ze zkoušky ohybem. [2]

Zkouška ohybem dává konstrukční podklady pro plasty, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb. Je zvláště vhodná pro křehké plasty, pro které je provedení tahové zkoušky obtížné. [2]

Normovaná zkušební metoda pro hodnocení ohybových plastů je uvedena v ČSN EN ISO 178. [2]

### **VLASTNÍ ZKOUŠKA:**

Zkouška byla prováděna na přístroji: INSTRON (obr. 29)

$v=5\text{mm/min}$

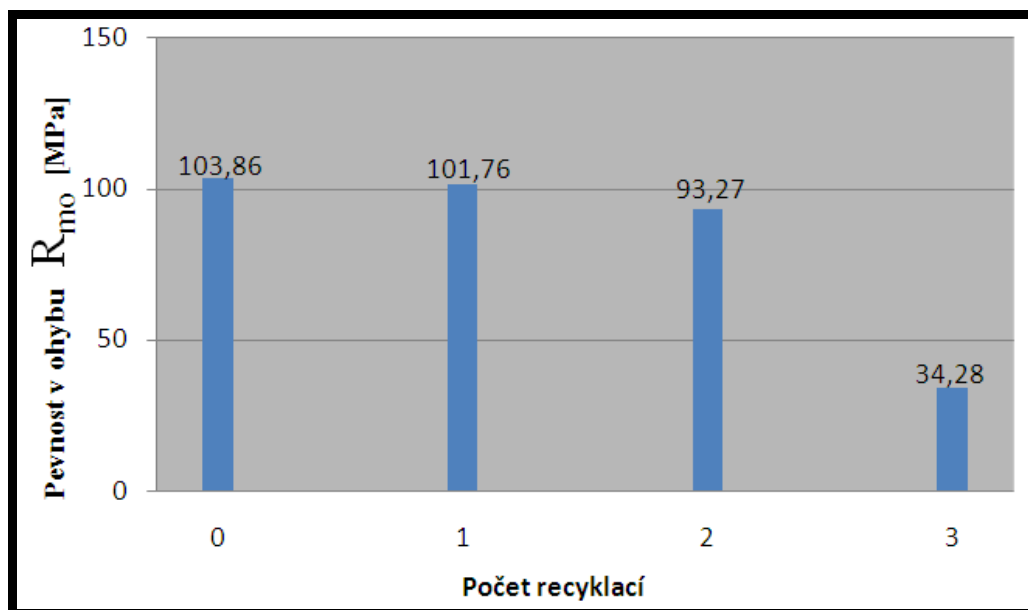
Šíře podpěr 64 mm



Obr. 29 Přístroj INSTRON

## VÝSLEDKY ZKOUŠKY:

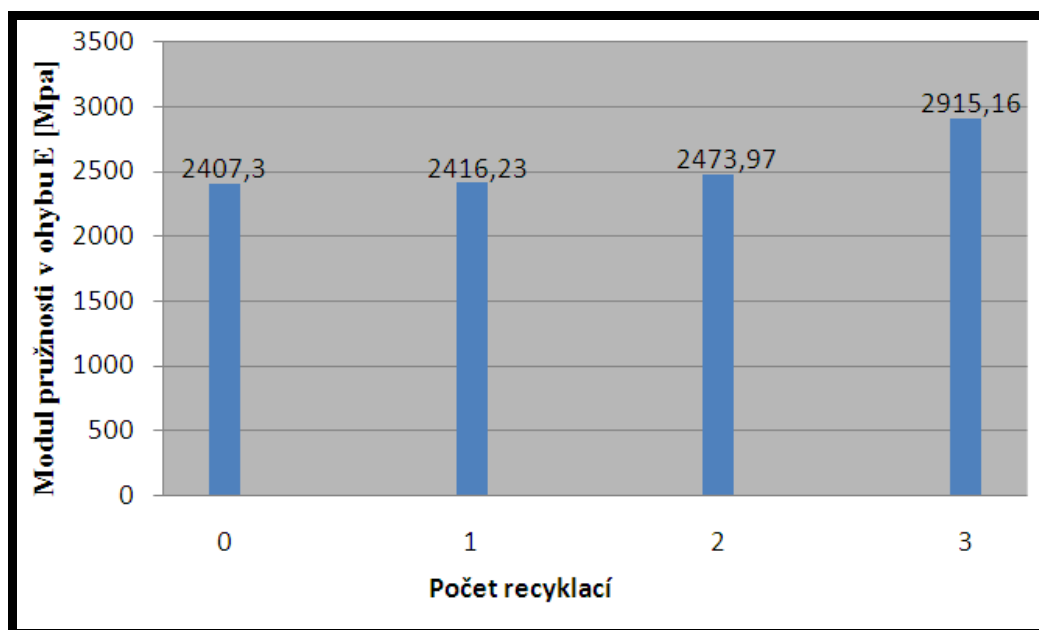
### -Pevnost v ohybu



Graf 2: Pevnost v ohybu

Z grafu č. 2 je patrné, že nejvyšší pevnost v ohybu je u 0. recyklátu, s dalšími recykláty pevnost v ohybu klesá.

### -Modul pružnosti v ohybu

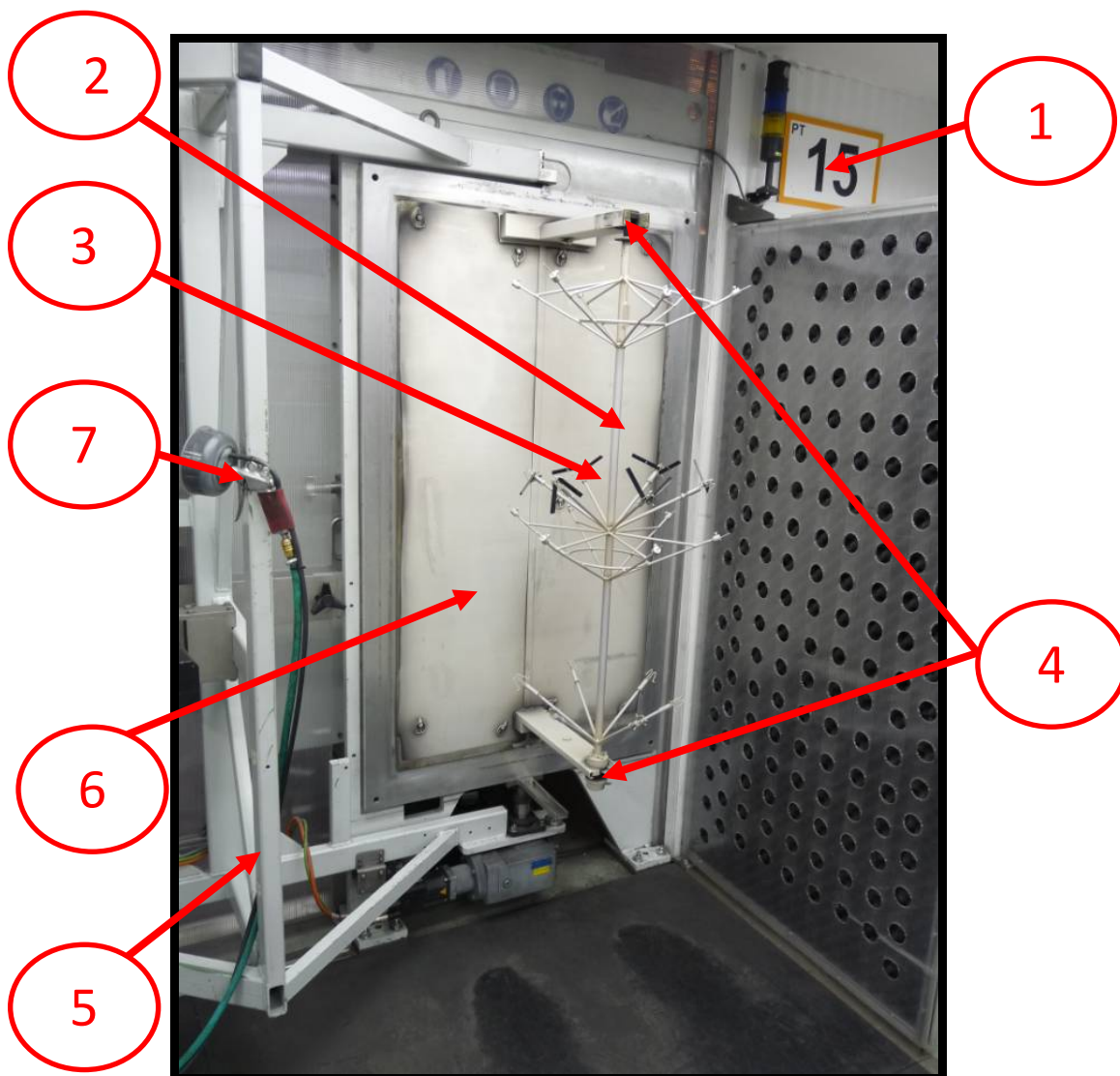


Graf 3: Modul pružnosti v ohybu

Z grafu č. 3 je patrné, že nejnižší modul pružnosti je u 0. recyklátu a naopak nejvyšší modul pružnosti u 3. recyklátu, který je také nejvíce křehký.

#### 4. Stanovení pokovovatelnosti

Vylisované označené vzorky (obr. 32) byly pokoveny na naprašovacím zařízení značky Leibold-Pylonmet VXL4 (obr. 30). Naprašovací zařízení pracuje v cyklu 5 minut.



Obr. 30 Naprašovací zařízení

**Vysvětlivky:** 1) Číslo pracoviště; 2) Planeta; 3) Zavěšené vzorky; 4) Ložiska umožňující otáčení planety; 5) Konstrukce zajišťující otevírání dveří; 6) Dveře; 7) Ionizovaný vzduch



Obr. 31 Ovládací panel naprašovacího zařízení



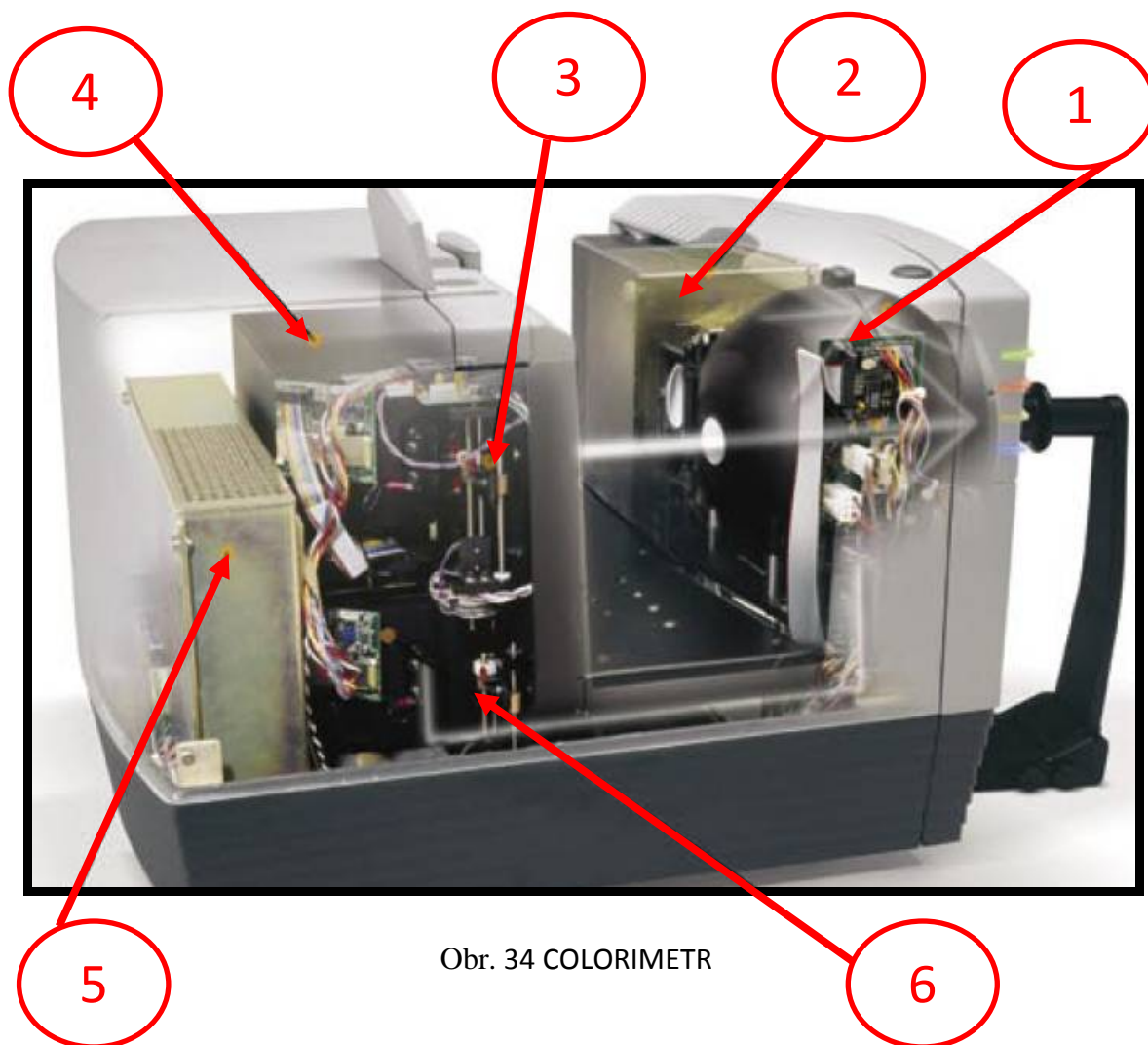
Obr. 32 Pokovená tělíska na planetě

Na pokovených zkušebních tělískách nebylo možné na první pohled posoudit rozdíl v optických vlastnostech. Recyklát jako takový nemá na pokovovatelnost velký vliv, avšak na mechanické vlastnosti jednoznačný. Na první pohled je zde vidět rozdíl mezi originálem a třetím recyklátem. Naopak mechanické vlastnosti se významně s dalšími recyklačními cykly zhoršují. Pokovovatelnost (světlost) byla měřena ve firmě Automotive Lighting s.r.o. na přístroji značky Hunter LAB (obr. 33).



Obr. 33 Měřicí zařízení na světlost Hunter LAB Ultra Scan

Přístroj Hunter Lab-Ultra Scan, neboli COLORIMETR (obr. 34) pracuje na principu odrazivosti vzorku. Do otevřené koule svítí z boku žárovka, koule vytváří rozptýlené světlo, vzorek je osvětlen a odráží světlo do senzoru, který zachytí celé spektrum.



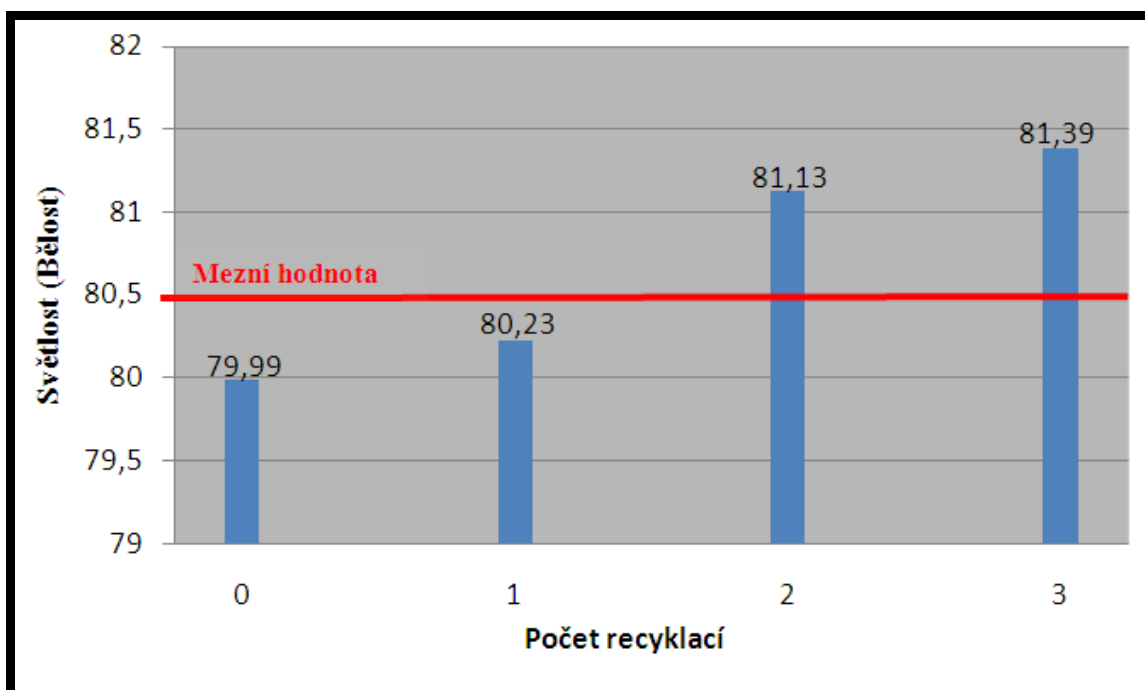
Obr. 34 COLORIMETR

**Vysvětlivky:** 1)Bílá koule; 2)Žárovka; 3)Převáděcí senzor; 4)Vyhodnocení dat-Sériový port; 5)Kontrolní senzor; 6)Identifikační systém



## VÝSLEDEK ZKOUŠKY:

### -Světlost (bělost)



Graf 4: Světlost (bělost)

Z grafu č. 4 je patrné, že nejnižší světlost vykazuje 0. recyklát, naopak nejvyšší hodnotu má 3. recyklát, protože je materiál mechanicky a tepelně namáhán. Objevují se zde povrchové vady, které zapříčiňují větší lámavost a odrazivost světla, která je zachycena na kontrolním senzoru.

Mezní hodnota odrazivosti podle firemní politiky ALCZ je zobrazena na grafu.

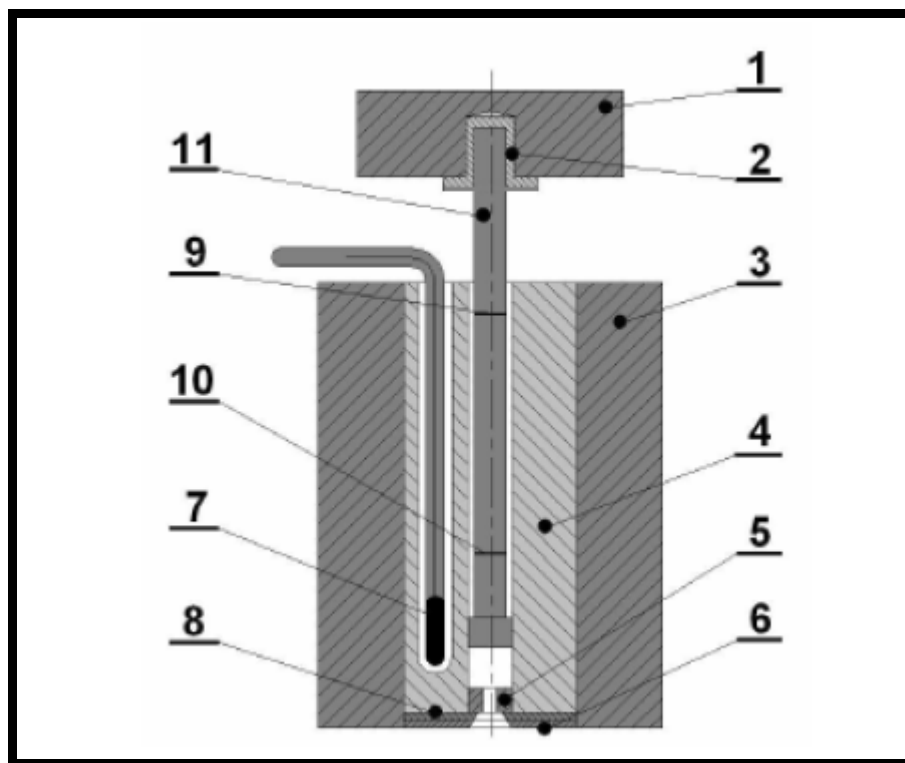
## 5. Stanovení indexu toku taveniny

Zpracovatelské technologie plastů jsou založeny na tváření polymeru při teplotách dostatečně nad teplotu zesklňování (skelného přechodu), ve stavu taveniny. [7]

Nejvýznamnější veličinou pro posouzení chování tavenin termoplastů a pro volbu technologie zpracování je ITT – index toku taveniny. Zkouška ITT je jedním z nejrozšířenějších testů v oblasti zpracování polymerů. Metoda pro stanovení ITT je založena na principu tlakového kapilárního viskozimetru při konstantním zatížení pístu



(obr. 35). Přesné uspořádání metody stanovení ITT je normalizováno a podmínky zkoušky se liší podle typu polymerní taveniny. [7]



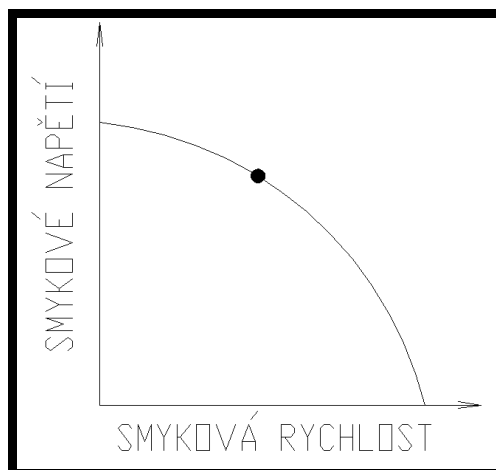
Obr. 35 Zkušební zařízení pro stanovení ITT [7]

1 – snímatelné závaží, 2,3 – izolace, 4 – válec, 5 – tryska, 6 – izolační deska, 7 – kontrolní teploměr, 8 – deska přidržující trysku, 9 – kontrolní referenční značka, 10 – spodní referenční značka, 11 – píst

Index toku je definován jako hmotnost materiálu v gramech, vytlačeného popsáním výtláčným kapilárním viskozimetrem za určitou časovou jednotku při předepsané teplotě, tlaku a rozměru kapiláry. [17] Na ITT můžeme pohlížet jako na jeden bod tokové křivky polymeru při konstantním smykovém napětí při poměrně malé smykové rychlosti. [7]

Další obdobnou metodou je stanovení objemového ITT. Zde se neodřezává struna, ale měří se vytlačený objem.

STANOVENÍ ITT :      -    [g/10 min]   - hmotnostní  
                              -    [cm<sup>3</sup>/10 min] - objemový



Obr. 36 Toková křivka polymeru [7]

### VLASTNÍ ZKOUŠKA:

Stanovení indexu toku taveniny bylo provedeno na měřicím zařízení Meltfixer<sup>MT</sup> (obr. 37) se závažím 2,16 kg.

Postup: Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN ISO 1133. Měřicí zařízení bylo předeřáté, čas předeřátí je nejméně 4 minuty, teplota se volí podle typu materiálu, u našeho materiálu bylo zvoleno 330°C (u materiálů s ITT 10g/10min se do kapiláry vkládá zátk). Do násypky byly nasypány granule. Pomocí konstantně zatěžovaného pístu, který byl vtlačován do roztaveného materiálu, byl naměřen objemový index toku taveniny.



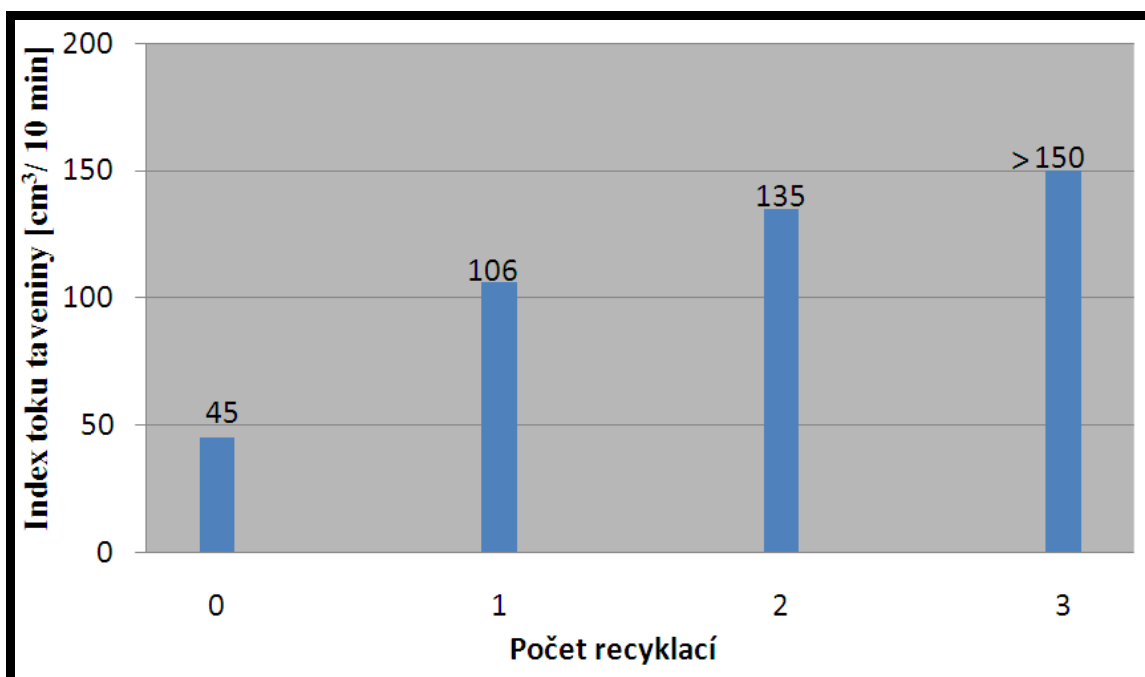
Obr. 37 Zařízení Meltfixer<sup>MT</sup>



Obr. 38 Píst se závažím

## VÝSLEDEK ZKOUŠKY:

### -Index toku taveniny



Graf 5: Index toku taveniny

Z grafu č. 5 je patrné, že nejnižší ITT má 0. recyklát, s dalšími recykláty ITT prudce stoupá. 3. recyklát vykazoval nejvyšší ITT (neměřitelný), což bylo způsobeno degradací materiálu.

# Diskuse výsledků

V bakalářské práci byly provedeny zkoušky:

- Rázová houževnatost
- Pevnost v ohybu
- Stanovení ohybových vlastností
- Světlost (bělost)
- Index toku taveniny

Z naměřených hodnot plyne, že 0. recyklát (nerecyklovaný materiál) odpovídal materiálové specifikaci ve výše zmiňovaných zkouškách. Z naměřených hodnot u rázové houževnatosti je patrné, že 0. recyklát vykazuje nejvyšší rázovou houževnatost (zkušební tělíska nebyla přeražena). Rozdíl mezi 0. recyklátem a 1. recyklátem je 65%, tento rozdíl je způsoben strukturní změnou materiálu. S dalšími recyklačními cykly rázová houževnatost exponenciálně klesá, protože dochází k výraznému zkracování polymerního řetězce. Toto zkracování je natolik podstatné pro rázovou houževnatost, že třetí recyklát je natolik křehký, že jde rozlomit v ruce. Následující zpracování vstřikováním již není uskutečnitelné, neboť materiál je natolik zdegradovaný, že už nemá schopnost držet pohromadě v požadovaném tvaru.

U zkoušky pevnosti v ohybu je patrné, že 0. recyklát (103,76 MPa) a 1. recyklát (101,76 MPa) vykazují nepatrné rozdíly v naměřených hodnotách. Hodnota 0. recyklátu odpovídá tabulkové hodnotě. Mírný pokles mezi 0. a 1. recyklátem je způsobeno tím, že dochází sice ke zkracování řetězců, avšak to není natolik významné, aby to ovlivnilo výslednou pevnost. Výrazný pokles nastává až mezi 2. a 3. recyklátem, kdy výsledná hodnota 3. recyklátu je jen 34,28 MPa.

Modul pružnosti v ohybu je u 0. recyklátu srovnatelný s tabulkovou hodnotou [19], s dalšími recyklačními cykly plynule modul pružnosti narůstá. U nultého recyklátu je hodnota nejvyšší, protože řetězce jsou dlouhé a prostorově uspořádané. V tomto prostorovém uspořádání není příliš místa na pohyb jednotlivých segmentů. S narůstajícím počtem recyklačních cyklů klesá délka řetězců a zároveň se zvyšuje počet krátkých řetězců a odpadních produktů degradace včetně  $\text{CO}_2$ . To má za následek zlepšení možnosti uspořádání řetězců v oblasti pružné deformace. Příмым důsledkem je poté zvyšování modulu pružnosti v ohybu. [14]

Světlost (bělost) – maximální hodnota je stanovena podnikovou normou na 80,5. Požadavky normy splňují hodnoty u 0. a 1. recyklátu, recyklát 2 a 3 normu nesplňuje, zde již nebyla vytvořena lesklá, zrcadlová plocha. Důvodem je rozrušený povrch materiálu z důvodu degradace polymerních řetězců. Na povrchu vzorku je mnoho malých propadlin a nedokonalostí, které se pokovením ještě více zvýrazní. To vede k subjektivnímu vnímání povrchu jako zaběleného místo lesklého. Objektivně dochází k rozptylu a pohlcení části světla na nerovnostech a na ochranné polymerní vrstvě.

Index toku taveniny byl měřen podle normy ISO 1133 s parametry 330°C/2,16kg. ITT vykazuje u nultého recyklátu shodu s materiálovou specifikací. S první recyklací prudce narůstá hodnota ITT – zvyšuje se tekutost taveniny, to má rozhodující vliv na vstřikovací parametry. Nárůst je více jak dvojnásobný a je způsoben zkracováním makromolekulárních řetězců polykarbonátu a příměsí odpadních produktů degradace. Kratší řetězce se snáze zorientují a lépe tečou v zúžené geometrii kapiláry. Další recyklační cykly mění hodnoty ITT již nepříliš výrazně. Třetí recyklát byl již v takovém stupni degradace, že nebylo možno stanovit přesnou hodnotu ITT.

# Závěr

Bakalářská práce se zabývala stanovením technologických, mechanických a optických vlastností recyklátů. Z literární rešerže plyne, že materiál lze recyklovat vícekrát, různí autoři udávají různé hodnoty. Na snižování všech vlastností má s určitostí vliv degradace makromolekulárních řetězců polykarbonátu a také vliv podílu absorbovaného vzdušnou vlhkosti. Pro měření byl vybrán materiál APEC 1695, protože se používá v automobilovém průmyslu a má vynikající rázovou houževnatost a velmi dobrou tepelnou odolnost.

Z předsušeného originálního granulátu zvoleného materiálu byla vyrobena zkušební tělíska vstřikováním na laboratorním vstřikovacím zařízení Arburg. Část ze vstřikovaných tělísek byla podrobena měření zkoumaných hodnot, část byla odebrána k další recyklaci. Reálná recyklace byla simulována na vstřikovacím stroji a z recyklátu byla opětovně vyrobena zkušební tělíska. Recyklace proběhla celkem třikrát, dále byla zkušební tělíska nevyrobitelná. Na tělískách z nultého, prvního, druhého a třetího recyklátu byly hodnoceny následující vlastnosti:

- Rázová houževnatost
- Pevnost v ohybu
- Modul pružnosti v ohybu
- Světlost (bělost)
- Index toku taveniny

Materiálové vlastnosti se měnily s degradující vnitřní strukturou materiálu. Rázová houževnatost s recyklačními cykly exponenciálně klesala. Mez pevnosti v ohybu s přibývajícými recyklacemi klesala pozvolněji, zatímco modul pružnosti a světlost (bělost) rostly plynule. Vliv recyklačních cyklů na výsledné vlastnosti je názorně vidět na ITT, kde s následujícími cykly ITT strmě rostl.

Z naměřených výsledků vyplývá, že vhodný k použití v automobilovém průmyslu je nultý – tedy vstupní materiál a první recyklát. Recykláty vyšších stupňů jsou pro své výsledné vlastnosti nevhodné pro výrobu vzhledových dílů světlometů. Práce bude použita jako podklad pro výrobu a stanovování příčin zmetkovitosti a dále jako doporučení pro odpadové hospodářství.

# Použitá literatura

- [1] MLEZIVA, J., KÁLAL, J. Základy makromolekulární chemie. Praha: SNTL, 1986.
- [2] SOVA, M., KREBS, J., a kolektiv autorů. Termoplasty v praxi. Praha: Dashöfer Holding, Ltd. & Verlag Dashöfer, nakladatelství, s. r. o., 2001.
- [3] LENFELD, P.: Technologie II. - za podpory projektu FRVŠ 1998/2005 "Internetová podpora výuky technologie tváření kovů a plastů. [online]. [citace: 16. 04. 2010]. Dostupný z WWW: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/index.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm)
- [4] MM Průmyslové spektrum. [online]. [citace: 17. 05. 2010]. Dostupný z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd>
- [5] HUMÁR, A., Technologie obrábění I. Vysoké učení technické v Brně : Fakulta strojního inženýrství, ústav strojírenské technologie, 2003.
- [6] PLUHAŘ, J., Nauka o materiálech. Praha: SNTL, 1989.
- [7] SCHATZ, M., VONDRÁČEK, P. Zkoušení polymerů. Praha: SNTL, 1979.
- [8] HARPER, C. Handbook of Plastics, Elastomers and Composites, McGraw-Hill, 2002.
- [9] HARPER, C. Modern Plastic handbook (4th edition), McGraw-Hill, 2000.
- [10] PERÉZ<sup>a</sup> J.M., VILAS<sup>a</sup> J.L., LAZA<sup>a</sup> J.M., ARNÁIZ<sup>b</sup> S., MIJAGNOS<sup>a</sup> F., BILBAO<sup>c</sup> E., RODRÍGUEZ<sup>a</sup> M., LEÓN<sup>na</sup> L.M., Effect of reprocessing and accelerated ageing on thermal and mechanical polycarbonate properties, 2010.

- [11] ABBAS, K.B., Reprocessing of thermoplastics.II.Polycarbonate. Polym. Eng. Sci 20, 376-382. 1980.
- [12] ABBAS, K.B., Degradational effects on bisphenol A polycarbonate extruded at high shear stresses. Polymer 22, 836-841. 1981.
- [13] EGUIAZABAL, J.I., NAZABAL, J., Effect of reprocessing on the properties of bisphenol-A polycarbonate. Eur. Polym. J. 25, 891-893. 1989.
- [14] LONG, T.S., SOKOL, R.J., Molding polycarbonate: Moisture degradation effect on physical and chemical properties. Polym. Eng. Sci. 14. 817-822. 1974.
- [15] LA MANTIA, F. P., CORRENTI, A., Effect of processing conditions on the degradation and on the recycling of polycarbonate.Prog.Rubber Plast. Recycl. Technol.19, 135-142. 2003.
- [16] SHEA, J. W., NELSON, E. D., CAMMONS, R.R., Effect of recycling on the properties of injection molded polycarbonate.Tech. Pap.- Soc. Plast. Eng. 21, 614-617. 1975.
- [17] MEISSNER, B., ZILVAR, V. Fyzika polymerů. Praha: SNTL, 1987.
- [18] ROSATO, D: Injection molding handbook (3<sup>rd</sup> edition), Springer-Verlag, 2000.
- [19] Bayer s. r. o. [online]. [citace: 26. 03. 2010]. Dostupný z WWW: <http://www.bayer.com/>
- [20] Podniková norma Automotive Lighting, s. r. o., QP09-41



# Seznam příloh

- Příloha 1- materiálový list
- Příloha 2 - modul pružnosti v ohybu E- 1. recyklát
- Příloha 3 – stanovení rázové houževnatosti Charpy – 3. recyklát

# **Příloha 1**

## **materiálový list**



## Apec 1695

Easy-flow grades / easy-release

Easy flowing, easy to demold, softening temperature (VST/B 120) 158 °C

ISO Shortname

Property	Test Condition	Unit	Standard	Value
<b>Rheological properties</b>				
C Melt volume-flow rate	330 °C; 2.16 kg	cm <sup>3</sup> /10 min	ISO 1133	45
C Melt mass-flow rate	330 °C; 2.16 kg	g/10 min	ISO 1133	46
<b>Mechanical properties (23 °C/50 % r. h.)</b>				
C Tensile modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2400
C Yield stress	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	68
C Yield strain	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	6.2
C Nominal strain at break	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	> 50
C Charpy impact strength	23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eU	N
C Charpy impact strength	-30 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eU	N
C Flexural modulus	2 mm/min	MPa	ISO 178	2400
C Flexural strength	2 mm/min	MPa	ISO 178	105
C Ball indentation hardness		N/mm <sup>2</sup>	ISO 2039-1	120
<b>Thermal properties</b>				
C Temperature of deflection under load	1.80 MPa	°C	ISO 75-1,-2	138
C Temperature of deflection under load	0.45 MPa	°C	ISO 75-1,-2	150
C Vicat softening temperature	50 N; 120 °C/h	°C	ISO 306	158
C Coefficient of linear thermal expansion, parallel	23 to 55 °C	10 <sup>-6</sup> /K	ISO 11359-1,-2	0.7
C Coefficient of linear thermal expansion, transverse	23 to 55 °C	10 <sup>-6</sup> /K	ISO 11359-1,-2	0.7
C Burning behavior UL 94 (1.5 mm)	1.5 mm	Class	UL 94	HB
C Burning behavior UL 94	3.0 mm	Class	UL 94	HB
C Oxygen Index	Method A	%	ISO 4589-2	25
C Glow wire test (GWFI)	2.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	850
<b>Electrical properties (23 °C/50 % r. h.)</b>				
C Relative permittivity	100 Hz	-	IEC 60250	3
C Relative permittivity	1 MHz	-	IEC 60250	3
C Dissipation factor	100 Hz	10 <sup>-4</sup>	IEC 60250	7
C Dissipation factor	1 MHz	10 <sup>-4</sup>	IEC 60250	80
C Volume resistivity		Ohm·m	IEC 60093	1E14
C Surface resistivity		Ohm	IEC 60093	1E16
C Electrical strength	1 mm	kV/mm	IEC 60243-1	35
C Comparative tracking index CTI	Solution A	Rating	IEC 60112	275
C Comparative tracking index CTI M	Solution B	Rating	IEC 60112	<100
C Electrolytic corrosion		Rating	IEC 60426	A1
<b>Other properties (23 °C)</b>				
C Water absorption (saturation value)	Water at 23 °C	%	ISO 62	0.3
C Water absorption (equilibrium value)	23 °C; 50 % r. h.	%	ISO 62	0.12
C Density		kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183-1	1180
<b>Material specific properties</b>				
C Refractive index	Procedure A	-	ISO 489	1.578
C Luminous transmittance (clear transparent materials)	1 mm	%	ISO 13468-2	90

# Příloha 1



Bayer MaterialScience

## Apec 1695

Property	Test Condition	Unit	Standard	Value
Processing conditions for test specimens				
C Injection molding-Melt temperature		°C	ISO 294	330
C Injection molding-Mold temperature		°C	ISO 294	100
C Injection molding-Injection velocity		mm/s	ISO 294	200

C These property characteristics are taken from the CAMPUS plastics data bank and are based on the international catalogue of basic data for plastics according to ISO 10350.

Impact properties: N = non-break, P = partial break, C = complete break



## Apec 1695

### Disclaimer

#### Disclaimer for Sales products

This information and our technical advice - whether verbal, in writing or by way of trials - are given in good faith but without warranty, and this also applies where proprietary rights of third parties are involved. Our advice does not release you from the obligation to check its validity and to test our products as to their suitability for the intended processes and uses. The application, use and processing of our products and the products manufactured by you on the basis of our technical advice are beyond our control and, therefore, entirely your own responsibility. Our products are sold in accordance with the current version of our General Conditions of Sale and Delivery.

#### Test values

Unless specified to the contrary, the values given have been established on standardized test specimens at room temperature. The figures should be regarded as guide values only and not as binding minimum values. Please note that, under certain conditions, the properties can be affected to a considerable extent by the design of the mold/die, the processing conditions and coloring.

#### Processing note

Under the recommended processing conditions small quantities of decomposition product may be given off during processing. To preclude any risk to the health and well-being of the machine operatives, tolerance limits for the work environment must be ensured by the provision of efficient exhaust ventilation and fresh air at the workplace in accordance with the Safety Data Sheet. In order to prevent the partial decomposition of the polymer and the generation of volatile decomposition products, the prescribed processing temperatures should not be substantially exceeded.

Publisher: Global Innovations - Polycarbonates

Bayer MaterialScience AG,

D-51368 Leverkusen,

[www.bayermaterialscience.com](http://www.bayermaterialscience.com)

[pcr-info@bayermaterialscience.com](mailto:pcr-info@bayermaterialscience.com)

Page 3 of 3 pages

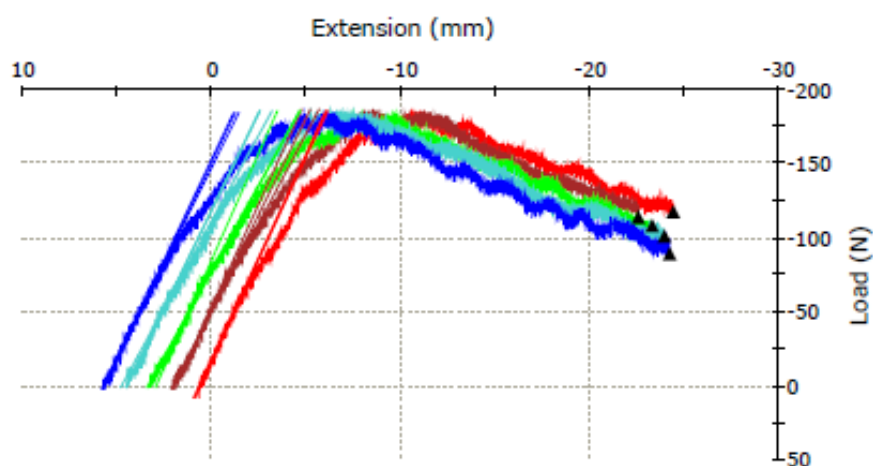
Edition 26.03.2010

**Apec<sup>®</sup>**  
ISO Datasheet

**Příloha 2**  
**modul pružnosti v ohybu E –**  
**1.recyklát**

## Příloha 2

Specimen 1 to 5



	Thickness (mm)	Width (mm)	Support span (mm)
1	4.15500	10.11800	64.00000
2	4.17600	10.15300	64.00000
3	4.15200	10.11600	64.00000
4	4.16300	10.12000	64.00000
5	4.15800	10.12000	64.00000
Minimum	4.15200	10.11600	64.00000
Maximum	4.17600	10.15300	64.00000
Standard Deviation	0.00942	0.01552	0.00000

	Axial Gauge Length (Strain Source) (mm)	Rate 1 (mm/min)	Modulus (Segment 5 N - 60 N) (MPa)
1	0.00000	5.00000	2536.38284
2	0.00000	5.00000	2296.56943
3	0.00000	5.00000	2117.45406
4	0.00000	5.00000	2392.54784
5	0.00000	5.00000	2442.79176
Minimum	-----	5.00000	2117.45406
Maximum	-----	5.00000	2536.38284
Standard Deviation	-----	0.00000	159.55883

	Modulus (Automatic) (MPa)	Modulus (Automatic Young's) (MPa)	Maximum Flexure extension (mm)
1	2512.02025	2484.71865	25.06993
2	2149.80475	2520.99259	24.58229
3	2089.88089	2651.26846	26.70615
4	2380.13032	2125.21429	28.40913
5	2396.30444	2298.73332	29.91993
Minimum	2089.88089	2125.21429	24.58229
Maximum	2512.02025	2651.26846	29.91993
Standard Deviation	178.32433	205.79394	2.24438

## Příloha 2

	Flexure load at Maximum Flexure extension (N)	Flexure stress at Maximum Flexure extension (MPa)	Flexure extension at Break (Cursor) (mm)
1	117.73109	64.70319	-----
2	113.80494	61.70452	-----
3	108.26528	59.59872	-----
4	101.21286	55.40049	-----
5	88.69171	48.66366	-----
Minimum	88.69171	48.66366	-----
Maximum	117.73109	64.70319	-----
Standard Deviation	11.46891	6.22768	-----






	Flexure load at Break (Cursor) (N)	Flexure strain at Break (Cursor) (mm/mm)	Flexure stress at Break (Cursor) (MPa)
1	-----	-----	-----
2	-----	-----	-----
3	-----	-----	-----
4	-----	-----	-----
5	-----	-----	-----
Minimum	-----	-----	-----
Maximum	-----	-----	-----
Standard Deviation	-----	-----	-----

	Flexure extension at Tensile Strength (mm)	Flexure stress at Tensile Strength (MPa)
1	11.41728	98.31563
2	10.42414	98.00435
3	11.07304	99.40874
4	13.85089	94.11529
5	11.82110	99.13586
Minimum	10.42414	94.11529
Maximum	13.85089	99.40874
Standard Deviation	1.29811	2.13643



**Příloha 3**  
**stanovení rázové houževnatosti**  
**Charpy – 3.recyklát**

## Příloha 3

Legends	Nr	F(m) kN	S(m) mm	V(m) m/s	W (ges.) J	(ak) KJ / m <sup>2</sup>	A mm <sup>2</sup>	Height mm	Width mm
	23	0,231	1,576	2,870	0,200	4,79	-	10,11	4,13
	24	0,257	1,949	2,852	0,253	6,09	-	10,12	4,11
	25	0,231	2,054	2,844	0,280	6,60	-	10,15	4,20
	26	0,215	1,655	2,871	0,237	5,66	-	10,11	4,13
	27	0,236	2,118	2,843	0,330	7,78	-	10,15	4,20

### Statistics:

Sub-series #4 n = 5	F(m) kN	S(m) mm	V(m) m/s	W(ARE) J	(ak) KJ / m <sup>2</sup>
$\bar{x}$	0,234	1,870	2,856	0,533	6,18
s	0,015	0,242	0,014	0,086	1,11
v	6,46	12,93	0,48	16,09	18,01